

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
КОЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОГО МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА

ГЕОЛОГИЯ И МИНЕРАГЕНИЯ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА



Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции
и IV Ферсмановской научной сессии, посвященных 90-летию со дня рождения
акад. А.В. Сидоренко и д.г.-м.н. И.В. Белькова

Апатиты, 4-6 июня 2007 г.

Апатиты
2007

УДК 55+553 (470.21)

Геология и минерагения Кольского региона. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции и IV Ферсмановской научной сессии, посвященных 90-летию со дня рождения акад. А.В. Сидоренко и д.г.-м.н. И.В. Белькова. Апатиты, 4-6 июня 2007 г. – Апатиты: Изд-во К & М, 2007. – 320 с.

В Трудах Всероссийской (с международным участием) научной конференции “Геология и минерагения Кольского региона”, минералогическая часть которой представляла собой IV Ферсмановскую научную сессию, опубликованы статьи по основным направлениям исследований, проводимых Геологическим институтом КНЦ РАН: геологии, геохронологии, изотопной геохимии, петрографии, минералогии, в том числе технологической и экспериментальной, и по истории геологического изучения региона. Издание представляет интерес для геологов широкого профиля и историков науки.

Научный редактор – д.г.-м.н., проф. Ю.Л. Войтеховский

Рекомендовано к печати Ученым советом Геологического института КНЦ РАН и Советом Кольского отделения РМО

Издано на средства Российского фонда фундаментальных исследований, грант 07-05-06026.

© Коллектив авторов, 2007

© Геологический институт Кольского научного центра РАН, 2007

© Кольское отделение Российского минералогического общества, 2007

АНИЗОТРОПИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В РАЗРЕЗЕ ФИНСКОЙ СКВАЖИНЫ ODB ДО ГЛУБИНЫ 1 КМ

М.В. Ковалевский, О.М. Тришина

Геологический институт КНЦ РАН, Анатумы, koval@geoksc.apatity.ru

Исследовательская скважина ODB, заложенная в ЮВ части Балтийского щита около отработанного полиметалльного месторождения Оутокумпу (Финляндия, г. Оутокумпу,) достигла предельной глубины 2516 м. Наряду с более ранними исследованиями, выполненными в разрезе Кольской и др. сверхглубоких скважин, изучение физических, в т.ч. упругих, параметров массива, вскрытого скважиной, позволит более полно представить упруго-анизотропные свойства кристаллических пород ЮВ части Балтийского щита. Изучение свойств пород показало, что все они являются упругоанизотропными и относятся к поперечно-изотропному и орторомбическому типам симметрии. Наблюдается незначительные изменения величин скорости распространения продольных и поперечных волн с увеличением глубины. Выявлен ряд эффектов, возникающих при распространении волн через анизотропные среды.

Введение

В ЮВ части Балтийского щита (Финляндия) пробурена скважина ODB, предназначенная для исследования строения массива, в котором расположено отработанное полиметалльное месторождение Оутокумпу. У поверхности находится толща (до 20 м) четвертичных осадков (ил, песок, гравий). Ниже скважиной вскрыты докембрийские магматические породы и породы, представленные слюдястыми и черными сланцами [7]. В диапазоне от 20 до 400 м преимущественно залегают слюдястые сланцы. В диапазоне от 400 до 1000 м расположены слюдястые сланцы с прослойками черных сланцев. Целью исследования явилось определение упругих и неупругих характеристик образцов пород, отобранных в пределах глубины до 1000 м, включающих: явление упругой анизотропии; эффекты, влияющие на распространение ультразвуковых волн в средах; скорости распространения упругих продольных и поперечных волн, коэффициенты и показатели анизотропии и др. Для этой цели проведены исследования упругих и неупругих свойств 14 образцов пород из разреза ODB. Определения выполнены на основе последних усовершенствований акустополяризационного метода и приборов для определения упругих свойств [2–4]. Полученные данные являются продолжением цикла изучения образцов пород глубоких и сверхглубоких скважин (Кольская СГ-3, Уральская СГ-4, немецкая КТВ) [5, 6].

Методика

Отобранные для исследований образцы представляют следующие породы: силлиманит-биотитовый сланец (обр. ODB-94_00), биотитовый сланец с графитом (ODB-202_20, ODB-247_45, ODB-391_70, ODB-506_10, ODB-1000_50), гранат биотитовый сланец с графитом (ODB-153_20, ODB-319_25, ODB-599_00, ODB-703_25, ODB-801_40, ODB-900_25), гранат-биотит хлоритовый сланец с графитом (ODB-351_90), биотит-силлиманитовый сланец с графитом (ODB-450_55). Образцы изготовлялись в форме куба. Нормали к трем взаимно перпендикулярным граням образца обозначены как направления 1, 2 и 3. Причем направление 3 выбрали совпадающим с осью скважины, а направления граней 1 и 2 являются произвольными.

Для диагностики анизотропии, определения числа и направленности элементов упругой симметрии применен акустополяризационный метод [2]. Принципиальная схема наблюдений по этому методу, не отличается от схемы, применяемой при поляризационных измерениях в оптике [1] и выполняется при помощи акустополяризоскопа [2]. Отличительной особенностью новой конструкции прибора является наличие автоматизированного привода поворотной платформы, и передача данных измерений непосредственно в ПЭВМ в реальном режиме времени [4]. Наиболее подробно методика проведения измерения описывается в работах [2,5]. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2.

Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов показал, что на характер акустополяриграмм влияют шесть встречающихся в различных сочетаниях и степени факторов: упругая анизотропия, эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛAAP), явление углового несогласия элементов упругой симметрии и направленности элементов ЛAAP [3], эффект деполяризации сдвиговых волн (ДСВ), микротрещиноватость и неоднородности. Практически все изученные образцы пород упругоанизотропны, т.к. на акустополяриграммах, полученных в положении векторы скрещены (ВС) наблюдаются фигуры, отличные от круговых (табл.). Практически во всех случаях проекции элементов упругой симметрии выделяются достаточно отчетливо [2]. При этом на всех акустополяриграммах возможно провести прямые линии, соединяющие минимумы изменения амплитуды сигнала, измеренного в положении ВС и тем самым определить пространственное положение проекций элементов упругой симметрии [2].

Таблица 1. Результаты измерений.

N	H	ρ	D	Матрица V_{ij} м/с	V_{pc}	V_{sc}	A_p	B_s	Акустополяриграммы образцов
ODB-94_00	94,00	2,80	0,22	5064 3250 2511	4378	2777	28,7	36,4	
			0,64	3192 4697 2463					
			0,65	2591 2657 3375					
ODB-153_20	153,20	2,62	0,19	5455 3623 2963	5357	3167	18,5	28,1	
			0,10	3609 6004 2967					
			0,15	2884 2958 4612					
ODB-202_20	202,20	2,72	0,22	5952 3719 3245	5944	3423	10,3	16,5	
			0,13	3735 6374 3420					
			0,09	3257 3161 5506					
ODB-247_45	247,45	2,70	0,05	5957 3684 3298	5907	3435	11,3	15	
			0,07	3662 6350 3320					
			0,05	3368 3280 5413					
ODB-319_25	319,25	2,62	0,04	6261 3776 3411	5815	3468	12,9	11,9	
			0,12	3595 5954 3389					
			0,07	3350 3287 5230					
ODB-351_90	351,90	2,75	0,07	6286 3815 3994	5666	3650	18,2	7,5	
			0,11	3629 5846 3694					
			0,50	3481 3289 4865					
ODB-391_70	391,70	2,70	0,08	5448 3470 3110	5501	3336	13,6	17	
			0,05	3693 6056 3246					
			0,08	3217 3277 5000					
ODB-450_55	450,55	2,78	0,45	5474 3645 3692	5321	3239	29,3	32,1	
			0,09	3700 6340 2681					
			0,26	2821 2895 4150					
ODB-506_10	506,10	2,64	0,20	6340 3766 3082	5934	3341	10,8	26,6	
			0,15	3722 6018 3120					
			0,06	3191 3168 5445					
ODB-599_00	599,00	2,72	0,05	5725 3604 3394	5787	3472	8,5	7,4	
			0,01	3584 6164 3442					
			0,05	3383 3424 5473					
ODB-703_25	703,25	2,73	0,14	6178 3803 3102	5553	3299	16,5	25,6	
			0,17	3580 5593 3069					
			0,13	3085 3154 4887					
ODB-801_40	801,40	2,76	0,08	5861 3483 3652	5453	3313	10,1	32,4	
			0,13	3578 5408 3163					
			0,28	3444 2557 5088					
ODB-900_25	900,25	2,72	0,22	5049 3511 2390	4373	2852	52,2	53,4	
			0,09	3478 5542 2443					
			0,46	2825 2463 2530					
ODB-1000_50	1000,50	2,72	0,10	6150 3714 3125	5325	3323	25,6	23,2	
			0,22	3667 5556 3141					
			0,07	3111 3177 4268					

Примечания: N – номер образца; H – глубина извлечения образца, м; ρ – плотность образцов, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; D – эффект линейной акустической анизотропии поглощения; V_{pc} – средняя скорость продольных волн в образце; V_{sc} – средняя скорость поперечных волн в образце; A_p – обобщенный коэффициент анизотропии по продольным волнам; B_s – обобщенный показатель анизотропии по поперечным волнам.

Обзор матриц показывает, что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие (табл. 1, рис. 1). При анализе скоростных характеристик каждого образца наблюдается определенная разница в конкретных значениях V_p и V_s , представленных в матрицах. Из всех образцов, наибольшая и наименьшая величины скорости V_p зарегистрированы в образце ODB-202_20 ($V_p = 5940 \text{ м/с}$) и в образце обр. ODB-900_25 ($V_p = 4370 \text{ м/с}$). Максимальная скорость продольных и поперечных колебаний в образцах ODB_94_00, ODB-319_25, ODB-351_90, ODB-506_10, ODB-703_25, ODB-801_40, ODB-1000_50 наблюдается в направлении грани 1-1'. Соотношения скоростей для

продольных волн ($V_{11} > V_{22} > V_{33}$, $V_{22} > V_{11} > V_{33}$) может свидетельствовать об орторомбическом типе упругой симметрии образцов. Однако анализ акустополляриграмм и пар скоростей распространения сдвиговых волн (V_{13} , V_{31} ; V_{23} , V_{32}) образцов (табл., обр. ODB-153_20, ODB-319_25, ODB-506_10, ODB-703_25, ODB-1000_50) указывает на принадлежность образцов к поперечно-изотропному типу с осью симметрии среды, проходящей в направлении 3-3'. Другие образцы, согласно приведенным неравенствам и характеру акустополляриграмм 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 [2]. 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 симметрии образцов необходимо изготовить из каждого кубический образец, грани которого будут параллельны выявленным элементам симметрии образца и провести последующие акустополаризационные определения. Во всем диапазоне глубины до 1000 м отмечается незначительное отклонение величин скорости распространения продольных и поперечных волн от их усредненного значения в пределах 29 и 26 %, соответственно.

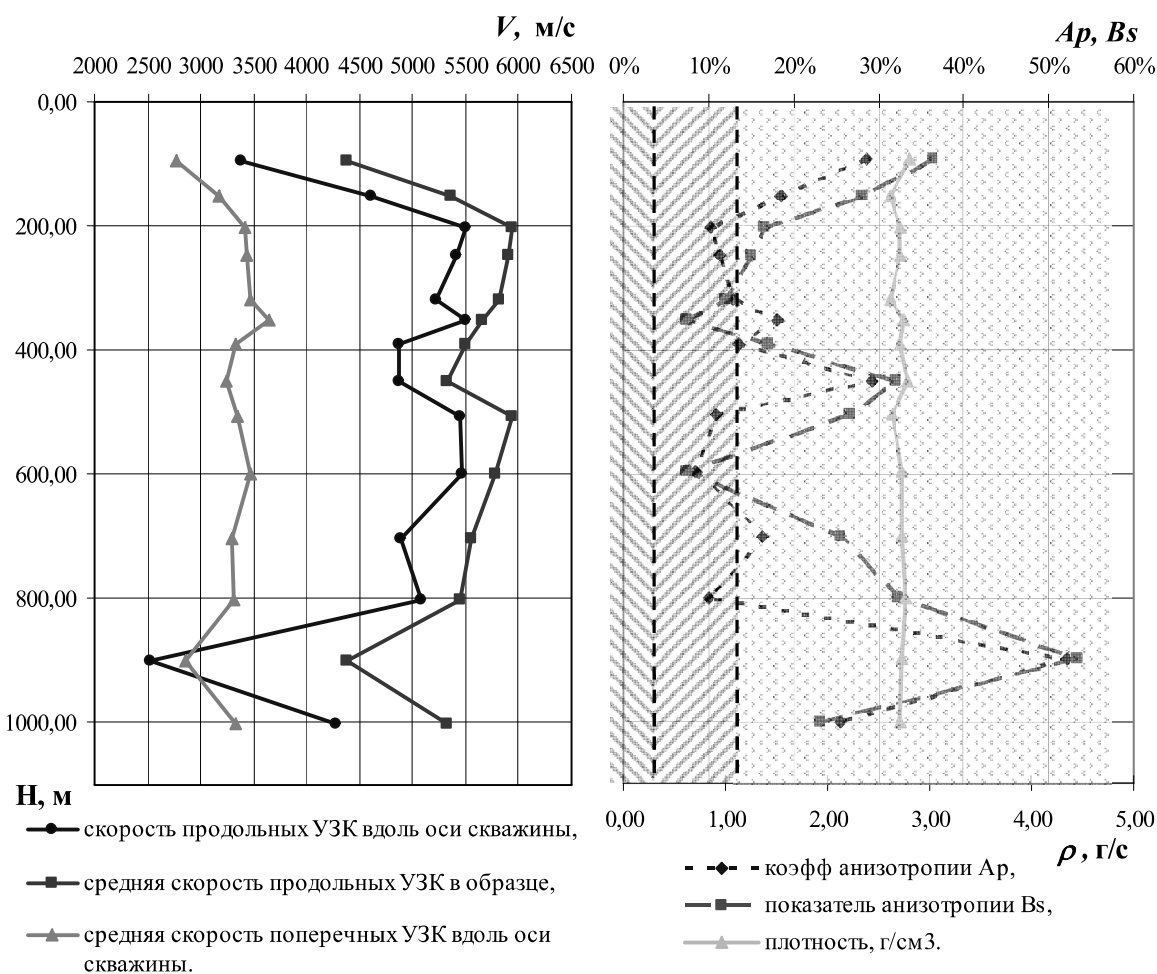


Рис. 1. Скорости распространения продольных и поперечных волн в диапазоне глубин до 1000 м в скважине ODB.

Рис. 2. Зависимость коэффициентов анизотропии по продольным УЗК A_p , показателя B_s , плотности ρ от глубины H залегания образцов скважины ODB.

На всех образцах наблюдается, проявляющий себя в различной степени, эффект линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) [3]. Характерным признаком его наличия является уплотненная форма акустополляриграммы ВП образца. Максимальное проявление ЛААП наблюдается у образца фибролит биотитового сланца (обр. ODB-94_00, гр. 2-2', $D = 0.64$; гр. 3-3', $D = 0.65$). Средняя степень проявления ЛААП (диапазон $0.1 < D < 0.5$ [2]) наблюдается в образцах (обр. ODB-153_20, ODB-202_20, ODB-450_55, ODB-506_10, ODB-703_25, ODB-801_40, ODB-900_25). В других образцах степень проявления ЛААП относительно мала. ($D < 0.1$ [2]). В обр. ODB_351_90 на разных гранях наблюдаются все возможные степени проявления ЛААП: грань 1-1' - без проявления ($D = 0.07$); грань 2-2' - со средней степенью проявления ($D = 0.11$); 3-3' - с высокой степенью проявления ($D = 0.50$). Возникновение

явления ЛААП при распространении волн через анизотропные среды связано с наличием в породе ориентированных в одном направлении минералов (биотит, мусковит). При этом наблюдается правильное чередование одних элементов, вытянутых в определенном направлении, с другими. С другой стороны ЛААП может возникать в связи с проявлением дезинтеграции, с возникновением систем микротрещин в процессе извлечения образца из скважины и разгрузки его от литостатических напряжений.

На акустополяриграммах образцов (обр. ODB-202_20, гр. 1-1'; ODB-450_55, ODB-900_25, гр. 3-3') наблюдается отклонение направления наибольшего пропускания ЛААП 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 такое рассогласование встречается, когда преимущественное направление микротрещин не совпадает с преимущественной ориентацией кристаллоупругих осей минеральных зерен [2].

Характер изменения амплитуды поперечных колебаний на акустополяриграммах ВС (обр. ODB-351_90, гр. 2-2'; ODB-391_70, гр. 2-2', 3-3'; ODB-391_70, ODB-801_40, гр. 2-2') позволяет сделать вывод о наличии явления ДСВ [2]. Это явление диагностируется в том случае, когда зарегистрированные минимумы амплитуд на акустополяриграмме ВС либо велики, либо не выделяются. ДСВ возникает при распространении сдвиговых волн через среды, состоящие из слоев или зерен, слагающих, например горную породу, в которых наблюдается разориентации элементов упругой симметрии. Сопровождается изменением степени поляризации цугов сдвиговых волн. Степень проявления этого эффекта позволяет оценить угол разориентировки элементов упругой симметрии в зернах (слоях) моно и полиминеральных горных пород.

В эксперименте не наблюдается существенных изменений плотности образцов с глубиной (рис.2). Следовательно, микротрещиноватость в пределах глубин до 1000 м обусловлена не дезинтеграцией образца при освобождении его от литостатической нагрузки, а естественным состоянием.

По данным рис.2 можно отметить четкую корреляцию между коэффициентом анизотропии A_p и показателем B_s . Полученные значения коэффициента анизотропии A_p и показателя B_s показывают, что все изученные образцы скважины ODB являются упругоанизотропными. Максимальные величины показателей анизотропии A_p и B_s определены у образца гранат-биотитового сланца с графитом (обр. ODB-900_25, $A_p = 52,2\%$, $B_s = 53,4\%$). Образцы с $0,05 < A_p < 0,15$ можно считать проявляющими слабую анизотропию, рис. 2 [2]. Образцы с $A_p > 0,15$ относятся к сильноанизотропным. Если эта анизотропия, в основном, обусловлена только микротрещиноватостью, возникшей при освобождении образца от литостатических напряжений, то ее величина изменится при нагружении образца до нагрузок, адекватным напряжениям пород *in situ*. Реальные величины анизотропии, отвечающие РТ-условиям массива, можно будет получить путем нагружения образцов на установках высокого давления.

Выводы

Изучение свойств образцов пород из диапазона глубин до 1000 м по разрезу финской скважины (ODB) показало, что все они являются упругоанизотропными и относятся к поперечно-изотропному и орторомбическому типам симметрии. По глубине наблюдается незначительное изменение величин скорости распространения продольных и поперечных волн. В образцах зарегистрировано проявление эффекта линейной акустической анизотропии поглощения, характер проявления которого связан с наличием систем микротрещин естественного характера. В некоторых образцах зарегистрирован эффект деполаризации сдвиговых волн, что свидетельствует о присутствии углового несогласия параметров направленности элементов ЛААП с элементами упругой симметрии. Характер изменения коэффициентов анизотропии для продольных A_p и соответствующего показателя для поперечных B_s колебаний по глубине проявляется одинаковым образом. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 07-05-00100-а.

Список литературы

1. Волкова Е.А. Поляризационные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1974. 156 с.
2. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия горных пород. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 204 с.
3. Горбачевич Ф.Ф. Акустополарископия порообразующих минералов и кристаллических пород. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 140 с.
4. Ковалевский М.В. К вопросу о совершенствовании методики исследований упругих характеристик геоматериалов методом акустополарископии // Информ. матер. 12-й научн. конф. "Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента". Сыктывкар: Геопринт, 2003. С. 123-125.
5. 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. Тр. XV сессии Росс. акустич. об-ва. Т. 1. М.: Геос, 2004. С. 323-328.
6. Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины 12261 м. Ред. Митрофанов Ф.П., Горбачевич Ф.Ф. Апатиты: МУП "Полиграф", 2000.
7. 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. Surv. Finland. Rep. Q10.2/2004/1. P 9-11.