

Акустопольризационные измерения упругоанизотропных свойств метаморфизованных пород по разрезу немецкой сверхглубокой скважины КТВ

© М. В. Ковалевский¹, Ф. Ф. Горбацевич¹, У. Хармс², Х.-А. Дальхайм², 2012

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН,
Апатиты, Россия

²Центр по исследованию Земли, Потсдам, Германия
Поступила 24 января 2011 г.

Представлено членом редколлегии Р. И. Кутасом

Немецька надглибока свердловина КТВ пройдена в масиві, який складений парагнейсами, метабазитами, гранітами і метаосадовими породами (Німеччина, Віндішешенбах), і досягла граничної глибини 9101 м. З метою складення загального швидкісного розрізу масиву визначено пружноанізотропні властивості на зразках порід, відібраних у діапазоні глибин 4,1—7,1 км. Для цього інтервалу густина порід $\rho = 2,75 \div 3,33$ г/см³, швидкість $V_P = 6,0 \div 7,1$, $V_S = 3,3 \div 4,0$ км/с; середні значення: $\rho = 3,0$ г/см³, $V_P = 6,7$, $V_S = 3,65$ км/с. На основі порівняння цих даних з верхньою частиною масиву (до 4 км) їх можна вважати загальними для всього розрізу. Всі вивчені зразки пружноанізотропні. На зразках керна КТВ виявлені ті самі явища, які раніше були встановлені у кернах Кольської надглибокої свердловини СГ-3.

The German superdeep borehole KTB drilled in the massif composed of paragneiss, metabasite, granite and metasedimentary rocks (Germany, Windischeshenbach) reached the maximum depth of 9101 m. Elastic-anisotropic properties of rock samples from the depth range of 4,1—7,1 km were determined to compile a general velocity section of the massif. Over this depth interval the rock density is within 2,75—3,33 g/cm³, $V_P = 6,0 \div 7,1$, $V_S = 3,3 \div 4,0$ km/s. Their average values are: $\rho = 3,0$ g/cm³, $V_P = 6,7$, $V_S = 3,65$ km/s. Having been compared with the similar data for the upper massif (from the surface down to 4 km depth) these data can be considered to be common for the entire section. All the samples studied are elastic anisotropic. The phenomena found on the KTB core samples were previously discovered at the Kola superdeep borehole.

Введение. Немецкая сверхглубокая скважина пробурена в тектонометаморфической зоне (зона Ербендорф-Вохенштраусс — ZEV) кристаллического основания Богемского массива, расположенного на юге Германии [Emmermann, Lauterjüng, 1997]. Этот массив рассматривается как сдвиговая зона, сформировавшаяся 330—400 млн лет назад. Пилотная скважина КТВ-VB достигла глубины 4000 м. Бурение главного ствола КТВ-НВ остановлено в 1994 г. на глубине 9101 м при температуре на забое около 265 °С.

Основными породами в разрезе скважины являются парагнейсы, метабазиты, граниты и метаосадочные породы. По принятой технологии бурения массовый отбор керна в скважине КТВ-VB был произведен до глубины 4 км. На рис. 1 представлены результаты измерений пористости, скорости распространения продоль-

ных и поперечных волн в разрезе скважины КТВ-VB от поверхности до глубины 4 км [Kern et al., 2001], измеренные в лабораторных условиях и условиях, моделирующих естественные.

Как видно, пористость образцов становится существенно меньше, чем в естественных условиях, что, по нашему мнению, связано с проявлением эффекта дезинтеграции при освобождении образцов пород от глубинных литостатических напряжений [Горбацевич, 2002]. Этот вывод подтверждается общей тенденцией снижения пористости с глубиной. И по результатам измерений на образцах, и по акустическому каротажу скорости распространения продольных (V_P) волн в массиве изменяются от 5,6 до 6,6 км/с, поперечных (V_S) — от 3,3 до 3,8 км/с.

В процессе буровых работ на скважине КТВ-VB полный отбор керна и подробное его

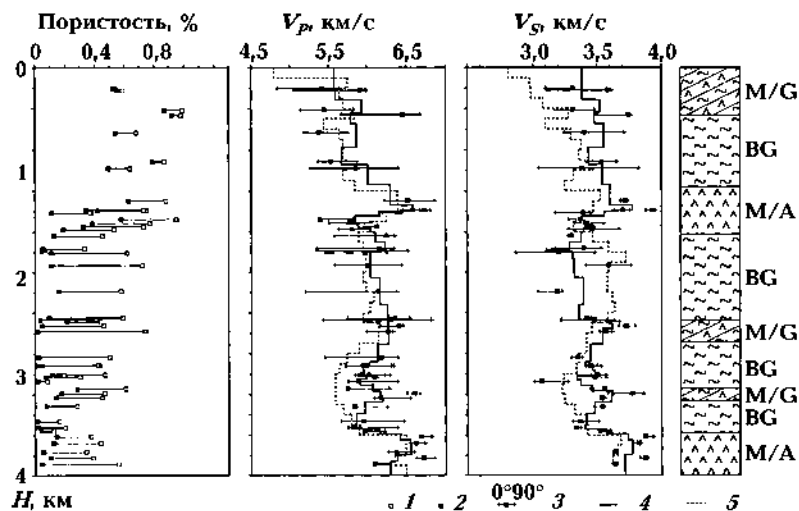


Рис. 1. Пористость, скорость распространения продольных и поперечных волн, измеренные на образцах и в массиве по разрезу скважины КТВ-ВВ до глубины 4 км [Kretz, 1983]. Скорости V_P и V_S измерены на образцах вдоль и поперек слоистости при соответствующих PT -параметрах (сплошные линии): 1 — измерения без нагружения образцов, 2, 3 — измерения в условиях *in situ*, 4 — среднее значение, 5 — данные акустического каротажа. М/Г — переслаивание парагнейсов и амфиболитов, ВГ — биотитовые гнейсы, М/А — переслаивание метагаббро и амфиболитов.

изучение было выполнено до глубины 4 км. На основной скважине (КТВ-НВ) глубже 4 км отбор керна производился лишь в отдельных точках разреза скважины (в общей сводке результатов петрофизических исследований приведено сравнительно мало данных [Berckhemer et al., 1997]. Например, на образцах не проводились определения скорости V_S . Оценка упругой анизотропии пород выполнялась способом измерений значений V_P по боковой поверхности керна скважины. Цель настоящей работы — изучение упругоанизотропных свойств образцов пород, отобранных в интервале глубин 4,1—7,1 км и их сравнение с известными данными. Среди отобранных восемь образцов представлены амфиболитами (h001, h003, h005, h014, h023, h025, h028, h030), два — амфиболороговообманковыми гнейсами (h007, h031), три — гранатовыми амфиболитами (h009, h010, h012), один — хлоритизированным амфиболитом (h033) (табл. 1). Образцы для исследований переданы сотрудниками U. Harms и H. A. Dalhaim из GeoForschungsZentrum, г. Потсдам, Германия.

Методика. На начальном этапе из керна скважины были изготовлены шлифы и образцы кубической формы (рис. 2). Нормали к трем взаимноперпендикулярным граням кубического образца обозначены как направления 1, 2 и 3, причем направление 3 выбрали совпадающим с осью скважины, а направления

граней 1 и 2 являются произвольными. По шлифам образцов выполнены определения типа, структуры, текстуры, вещественного состава пород. Примеры структур наиболее представительных пород (образцы h003, h005, h007, h009, h023, h025) приведены на рис. 3. Затем методом Архимеда определили плотность пород (ρ).

Для определения упругой анизотропии, скорости распространения продольных и поперечных волн, показателей анизотропии и т. д. был применен акустополяризационный метод [Горбацевич, 1995]. Схема наблюдений, осуществляемых по этому методу, не отличается от схемы, применяемой при поляризационных измерениях в оптике, однако измерения производятся с помощью преобразователей сдвиговых ультразвуковых колебаний, встроенных в прибор — акустополярископ [Ковалевский и др., 2001]. Отличительная особенность примененной конструкции прибора — автоматизированный привод поворотной платформы и передача данных измерений непосредственно в ПЭВМ в реальном режиме времени [Ковалевский, 2003]. Наиболее подробно методика описана в работах [Горбацевич, 2002; Ковалевский, 2009а].

В начале измерения проводятся при параллельных векторах поляризации излучателя и приемника колебаний (положение ВП). Затем векторы поляризации преобразователей устанавливаются под прямым углом (положение ВС). В итоге получают акустополяриграммы

Таблица 1. Петрографическая характеристика пород из разреза немецкой сверхглубокой скважины КТВ-НВ

Номер образца	Порода	Структура	Содержание минералов, %														
			Bt	Grt	Qz	Pl	PyAn.	Chl	Cb	Ttn	Czo	Rt	Cpx	Amp	Ep	Scp	Tur
h001	Амфибол-биотитовый гнейс	Лепидогранобластовая	19	—	10	64	1	—	—	1	—	—	—	5	—	—	—
h003	Биотитовый амфиболит	Лепидонематогранобластовая	8	—	—	25	1	—	—	5	—	—	—	61	—	—	—
h005	Апоэклогитовый гранатовый амфиболит	Симплектитовая	7	10	3	11	3	1	1	—	—	1	5	58	—	—	—
h007	Апогаббровый амфиболит	Бластогипидиоморфнозернистая	—	—	—	40	—	—	—	2	6	—	—	52	—	—	—
h009	Апоэклогитовый гранатовый амфиболит	Гранобластовая, симплектитовая	2	8	3	40	2	3	1	1	—	—	8	32	—	—	—
h010	Полосчатый гранатсодержащий амфиболит	Порфиробластовая, гранонематобластовая	—	3	3	50	1	8	—	—	—	—	—	35	—	—	—
h012	Гранатовый амфиболит	Порфиробластовая, гранонематобластовая	—	6	—	42	—	8	—	1	—	—	—	43	—	—	—
h014	Гранатовый амфиболит	Порфиробластовая, гранонематобластовая	7	12	2	30	5	5	—	—	—	—	—	39	—	—	—
h023	Амфиболит	Гранонематобластовая	—	—	—	18	5	—	—	—	—	—	—	77	—	—	—
h025	Амфиболит с турмалином	Гранонематобластовая	—	—	—	10	1	10	—	—	2	—	—	67	—	—	10
h028	Оруденелый м\з гранатовый амфиболит хлоритизированный	Порфиробластовая, гранонематобластовая	—	20	—	25	8	—	—	—	—	—	—	47	—	—	—
h030	Гранатовый амфиболит хлоритизированный	Порфиробластическая, гранонематобластовая	—	6	—	44	2	10	—	—	—	—	—	38	—	—	—
h031	Катаклазированный плагиогранит	Бластогипидиоморфнозернистая, катакластическая	—	—	20	57	—	15	—	6	—	—	—	—	—	2	—
h033	Хлоритизированный амфиболит	Нематобластовая	—	—	—	20	3	45	—	3	—	—	—	28	1	—	—

Примечание: номера образцов даны по каталогу КТВ-НВ [Emmermann et al., 1995]. Характеристика пород составлена канд. геол.-мин. наук Н. Е. Козловой, символы минералов приведены по [Kretz, 1983].

ВП и ВС — круговые диаграммы изменения амплитуды огибающей импульса, полученные в пределах полного угла поворота платформы акустополярископа. Акустополярископы, полученные в положении ВП, позволяют определить наличие и степень проявления эффекта линейной акустической анизотропии поглощения (ЛААП) [Горбацевич, 1995], в положении ВС — число и направленность проекций элементов упругой симметрии анизотропного образца в трех взаимных направлениях, а также выявить явление деполаризации сдвиговых волн [Горбацевич, 2002].

Полученные в трех взаимно перпендикулярных направлениях акустополярископы 13 образцов пород, отобранных в разных точках ствола КТВ (см. табл. 1), представлены на рис. 4.

На последующих этапах в соответствии с выявленными пространственными направлениями элементов упругой симметрии измеряли скорости распространения двух квазипоперечных (сдвиговых) и одной продольной волн на каждой грани образца. Результаты определений записываются в виде квазиматрицы скоростей V_{ij} [Горбацевич, 2002]:

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

где V_{11} , V_{22} , V_{33} — скорости распространения продольных колебаний, измеренные в направ-

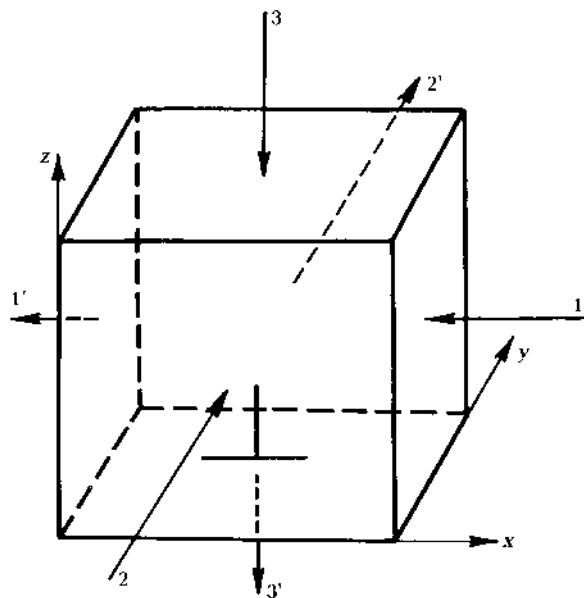


Рис. 2. Обозначения направлений на кубическом образце для акустополаризационных измерений.

лениях 1—1'; 2—2'; 3—3' кубического образца; V_{12} и V_{13} — скорости распространения сдвиговых колебаний, измеренные в направлении 1—1' при ориентировке вектора поляризации излучателя соответственно в направлениях 2—2' и 3—3'. Аналогично обозначены V_{21} , V_{23} , V_{31} , V_{32} .

На каждой из акустополариграмм ВП степень проявления эффекта ЛААП определяли по формуле [Горбачевич, 1995]

$$D = \frac{A_{md} - A_{nd}}{A_{md} + A_{nd}}, \quad (2)$$

где A_{md} — максимальный, A_{nd} — минимальный диаметр акустополариграммы.

Обобщенный коэффициент анизотропии образца в целом по продольным колебаниям A_p вычисляли по формуле [Горбачевич и др., 2002]

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

где

$$V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3. \quad (4)$$

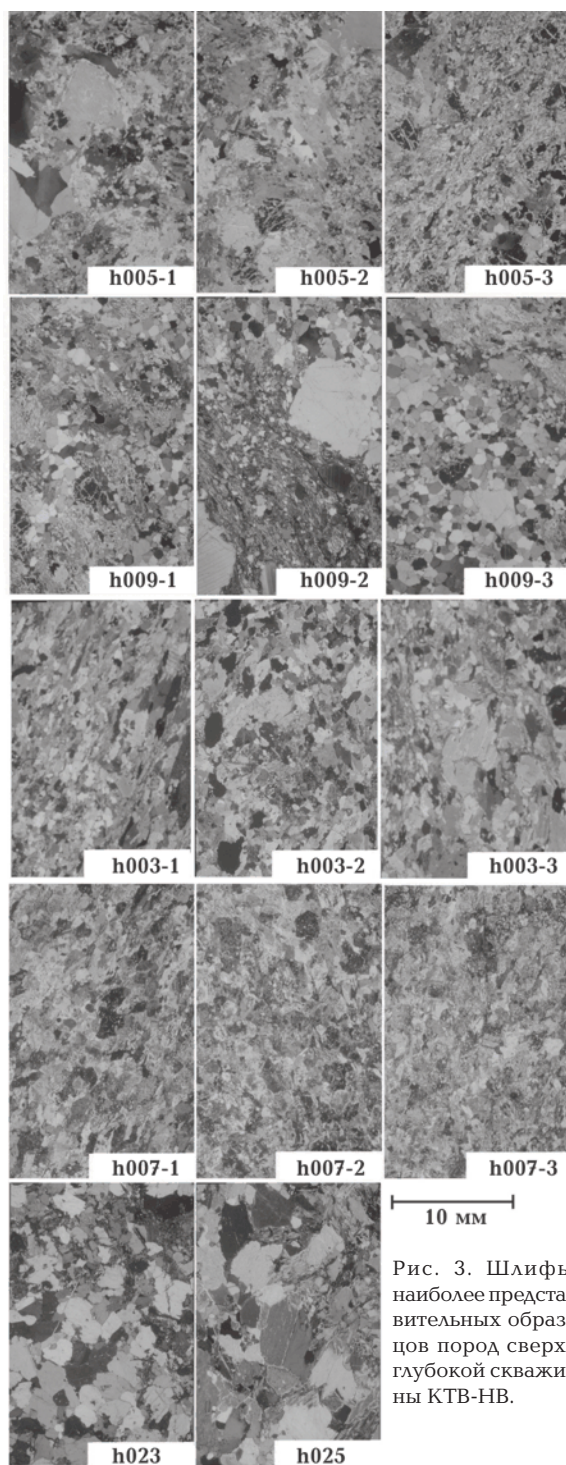


Рис. 3. Шлифы наиболее представительных образцов пород сверхглубокой скважины КТВ-НВ.

Обобщенный показатель анизотропии образца по поперечным колебаниям B вычисляли по формуле [Горбачевич и др., 2002]

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}, \quad (5)$$

где

$$B_1 = \frac{2(V_{12} - V_{13})}{(V_{12} + V_{13})}; \quad B_2 = \frac{2(V_{21} - V_{23})}{(V_{21} + V_{23})};$$

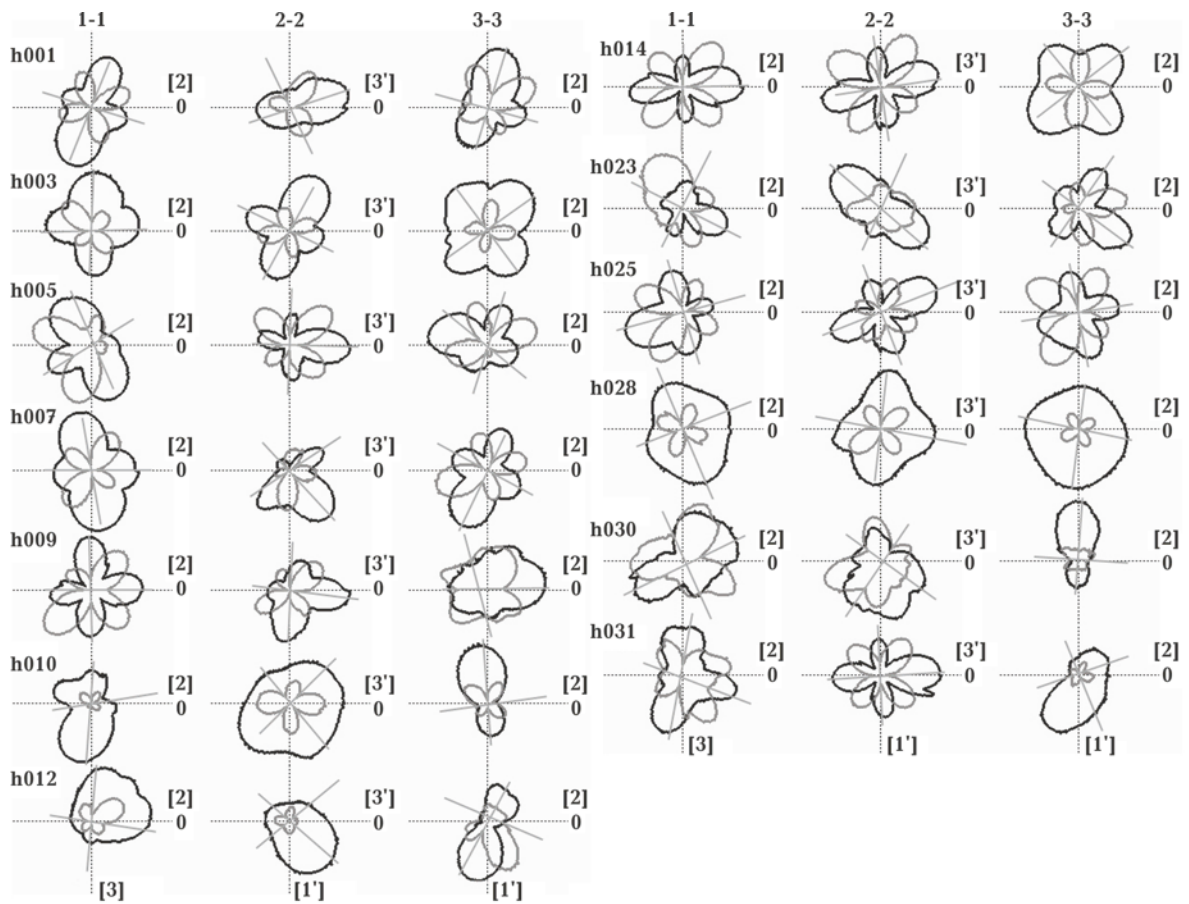


Рис. 4. Акустополяриграммы образцов пород из разреза немецкой сверхглубокой скважины КТВ-НВ. Амфиболиты: h001, h003, h005, h014, h023, h025, h028, h030; амфиболовые роговообманковые гнейсы: h007, h031; гранатовые амфиболиты: h009, h010, h012. Черным цветом показаны параллельные векторы, серым — скрещенные.

$$B_3 = \frac{2(V_{31} - V_{32})}{(V_{31} + V_{32})}$$

— показатели двулучепреломления, определенные по значениям скорости сдвиговых волн в направлениях 1—1'; 2—2'; 3—3'.

Определенные значения плотности, степени проявления ЛААП D [Ковалевский, 2009б; 2010], матрицы скорости V_{ij} , коэффициенты и показатели анизотропии A_p, B представлены в табл. 2. Зависимости скорости распространения продольных и поперечных колебаний от глубины отбора образцов показаны на рис. 6; от плотности — на рис. 5, от анизотропии — на рис. 7.

Обсуждение результатов. Согласно петрографическому описанию образцов, выполненному по шлифам (см. рис. 3), породы представлены в основном гранатовыми амфиболитами бластогипидиоморфнозернистой, гранобластовой, гранонематобластовой, нематобластовой, порфиробластической, симплектитовой структур. В минеральном составе большинства

образцов преобладает амфибол и плагиоклаз, за исключением образца h031, в котором амфибол отсутствует (см. табл. 1).

По данным табл. 2 плотность образцов КТВ-НВ находится в пределах 2,69—3,09 г/см³. Верхние значения плотности обусловлены высоким содержанием граната (преимущественно альмандина, $\rho=4,18$ г/см³), нижние — преобладанием плагиоклаза ($\rho=2,65$ г/см³) [Беликов и др., 1970]. Известные данные показывают, что плотность пород является довольно консервативной характеристикой и мало изменяется при изменении PT -условий, в которых находится порода [Головатая и др., 2006].

На акустополяриграммах ВП и ВС большей части образцов (см. рис. 4) наблюдаются симметричные четырехлепестковые фигуры, что означает наличие в породах упругой анизотропии. На акустополяриграммах ВС практически везде можно провести прямые линии, соединяющие минимумы амплитуды проходящего через образец сигнала и тем самым определить пространственное положение проекций эле-

Таблица 2. Упругоанизотропные свойства некоторых образцов пород из разреза немецкой сверхглубокой скважины КТВ-НВ

Номер образца	Глубин отбора, м	Плотность ρ_p , г/см ³	ЛЛААП, D_1, D_2, D_3	Матрица V_{ij} , км/с			V_{PC} , км/с	V_{SC} , км/с	Соотношения в матрице V_{ij}	A_p , %	B_S , %	Тип симметрии
				V_{11}	V_{22}	V_{33}						
h001	4149	2,71	0,05	4,78	3,04	2,89	5,11	3,05	$V_{22} > V_{33} \sim V_{11}$ $V_{23} > V_{21} = V_{32} > V_{12} > V_{13} = V_{31}$ $(V_{23} > V_{32}) > (V_{21} > V_{12}) > (V_{13} = V_{31})$	14,0	10,1	P
			0,13	3,14	5,69	3,27						
			0,14	2,88	3,11	4,86						
h003	4251	2,88	0,02	4,96	3,21	2,91	4,76	3,02	$V_{22} \sim V_{11} > V_{33}$ $V_{12} = V_{21} > V_{31} > V_{13} \sim V_{23} \sim V_{32}$ $(V_{12} = V_{21}) > (V_{31} > V_{13}) > (V_{23} \sim V_{32})$	14,6	16,0	P
			0,03	3,20	5,11	2,88						
			0,01	3,06	2,85	4,20						
h005	4447,2	3,09	0,06	5,21	3,09	3,13	4,97	3,02	$V_{11} > V_{22} > V_{33}$ $V_{13} = V_{21} = V_{12} > V_{23} \sim V_{32} = V_{31}$ $(V_{13} > V_{31}) = (V_{21} = V_{12}) > (V_{23} \sim V_{32})$	7,1	5,3	P
			0,04	3,13	5,00	2,97						
			0,03	2,90	2,93	4,71						
h007	4592,3	2,81	0,03	5,36	3,01	3,35	5,12	3,17	$V_{33} = V_{11} > V_{22}$ $V_{31} \sim V_{13} > V_{32} = V_{21} > V_{12} = V_{23}$ $(V_{31} \sim V_{13}) > (V_{32} > V_{23}) = (V_{21} > V_{12})$	12,4	14,6	P
			0,04	3,10	4,60	3,01						
			0,03	3,42	3,11	5,39						
h009	4684,7	2,88	0,01	5,76	3,42	3,24	5,42	3,28	$V_{11} \sim V_{22} > V_{33}$ $V_{21} = V_{12} \sim V_{23} > V_{13} > V_{31} = V_{32}$ $(V_{21} = V_{12}) \sim (V_{23} > V_{32}) > (V_{13} > V_{31})$	11,8	5,9	P
			0,01	3,42	5,60	3,34						
			0,20	3,15	3,12	4,91						
h010	4820	2,92	0,05	5,41	3,44	3,38	5,71	3,47	$V_{22} > V_{33} \sim V_{11}$ $V_{23} > V_{21} > V_{12} \sim V_{32} = V_{13} \sim V_{31}$ $(V_{23} > V_{32}) > (V_{21} > V_{12}) > (V_{13} \sim V_{31})$	9,6	3,9	P
			0,01	3,60	6,15	3,69						
			0,39	3,32	3,40	5,56						
h012	5082	2,83	0,00	5,42	2,97	3,28	5,01	3,00	$V_{11} > V_{33} > V_{22}$ $V_{13} > V_{31} > V_{12} \sim V_{32} \sim V_{23} > V_{21}$ $(V_{13} > V_{31}) > (V_{12} > V_{21}) \sim (V_{32} \sim V_{23})$	15,1	12,3	Г
			0,23	2,79	4,41	2,90						
			0,38	3,12	2,93	5,19						
h014	5378	2,87	0,05	5,81	3,54	3,33	5,56	3,36	$V_{11} > V_{22} > V_{33}$ $V_{12} \sim V_{21} > V_{32} \sim V_{13} > V_{23} \sim V_{31}$ $(V_{12} \sim V_{21}) > (V_{32} > V_{23}) \sim (V_{13} > V_{31})$	6,8	11,5	P
			0,05	3,48	5,60	3,23						
			0,01	3,18	3,39	5,28						
h023	6148,2	2,90	0,02	5,38	3,25	3,04	5,15	3,01	$V_{11} = V_{22} > V_{33}$ $V_{21} = V_{12} > V_{31} \sim V_{13} > V_{32} > V_{23}$ $(V_{21} = V_{12}) > (V_{31} \sim V_{13}) > (V_{32} > V_{23})$	10,5	23,7	P
			0,09	3,27	5,37	2,68						
			0,00	3,08	2,74	4,71						
h025	6244,7	2,89	0,00	4,50	3,15	3,03	4,67	3,09	$V_{22} > V_{33} = V_{11}$ $V_{21} > V_{12} > V_{23} = V_{32} \sim V_{13} > V_{31}$ $(V_{21} > V_{12}) > (V_{23} = V_{32}) \sim (V_{13} > V_{31})$	8,5	9,6	P
			0,05	3,30	4,99	3,08						
			0,01	2,90	3,07	4,52						
h028	6434,5	2,93	0,02	5,10	3,07	3,10	4,96	3,06	$V_{11} = V_{22} > V_{33}$ $V_{21} \sim V_{23} = V_{13} = V_{12} \sim V_{31} > V_{32}$ $(V_{21} \sim V_{12}) \sim (V_{23} > V_{32}) = (V_{13} \sim V_{31})$	5,8	4,2	Г
			0,02	3,15	5,07	3,11						
			0,01	3,03	2,92	4,73						
h030	6668	2,69	0,45	4,50	2,63	2,25	3,88	2,41	$V_{11} > V_{22} > V_{33}$ $V_{12} > V_{23} = V_{21} > V_{32} > V_{13} > V_{31}$ $(V_{12} > V_{21}) > (V_{23} > V_{32}) > (V_{13} > V_{31})$	23,9	18,7	P
			0,09	2,49	3,94	2,51						
			0,86	2,16	2,41	3,19						
h031	7011,3	2,70	0,05	6,09	3,55	3,29	5,41	3,27	$V_{11} > V_{22} > V_{33}$ $V_{12} > V_{21} > V_{13} = V_{23} > V_{31} > V_{32}$ $(V_{12} > V_{21}) > (V_{13} > V_{31}) = (V_{23} > V_{32})$	22,9	9,8	Г
			0,03	3,46	5,73	3,27						
			0,06	3,05	3,00	4,42						

Примечание: V_{PC} , V_{SC} — средние значения скорости продольных и поперечных волн в образце соответственно; A_p — обобщенный коэффициент анизотропии по продольным волнам; B_S — показатель анизотропии по поперечным волнам; P, Г — тип симметрии образца (орторомбический, псевдогексагональный соответственно).

ментов упругой симметрии. Три проекции по трем парам граней образца позволяют определить пространственное положение элементов симметрии [Горбацевич, 1995].

Акустополярнограммы ВП некоторых образцов имеют отчетливо уплощенные очертания. Это свидетельствует о проявлении эффекта ЛААП. Максимальное проявление ЛААП наблюдается у образца гранатового амфиболита (обр. h030, ось 1—1', $D_1=0,45$; ось 2—2', $D_2=0,86$). Он также заметно проявляется в образцах амфибол-биотитового гнейса (обр. h001, ось 1—1', $D_2=0,13$, ось 2—2', $D_3=0,14$), гранатовых амфиболитов (обр. h009, ось 3—3', $D_3=0,2$; h010, ось 3—3', $D_3=0,39$; h012, ось 2—2', $D_2=0,23$, ось 3—3', $D_3=0,38$). Этот эффект, как правило, проявляется при наличии ориентированной микротрещиноватости или преимущественной ориентировки удлиненных зерен минералов. В перечисленных образцах проявление ЛААП также связано с присутствием в породе ориентированных в одном направлении минералов, таких как амфибол, биотит, хлорит и др. (h001 — 19 % Вi; h009, h010, h012, h030 — до 52 % Аmр; h033 — 45 % хлорита).

Эффект ЛААП может проявляться при возникновении систем ориентированных микротрещин в породе при разгрузке образца от литостатических напряжений в процессе его выбуривания и извлечения на поверхность [Горяинов и др., 1992]. Так как изучаемые образцы были извлечены с глубины 4,1—7,1 км, влияние микротрещин разгрузки на проявление эффекта ЛААП нельзя исключить.

На акустополярнограммах некоторых образцов (обр. h001, ось 3—3'; h005, ось 1—1', 3—3'; h007, ось 1—1', 2—2'; h009, ось 1—1', 2—2'; h012, ось 3—3'; h023, ось 1—1'; h031, ось 1—1') наблюдается отклонение направления наибольшего пропускания ЛААП от положения проекций элементов упругой симметрии — так называемое явление углового несогласия (УНС). Это явление проявляется в специфической форме акустополярнограммы ВС — ее лепестки при сохранении симметрии имеют разную площадь. Максимальная амплитуда диаграмм ВС при этом может превзойти амплитуду ВП. Явление, как правило, регистрируется при угловом несогласии направленности элементов, ответственных за проявление эффекта ЛААП, с элементами упругой симметрии [Горбацевич, 2002]. Чаще всего такое рассогласование встречается, когда преимущественное направление микротрещин не совпадает с преимущественной ориентацией кристаллоупругих осей мине-

ральных зерен. Наиболее характерный пример проявления УНС по всем трем граням зафиксирован в образце h010 полосчатого гранатосодержащего амфиболита (см. рис. 4). Образец h010 содержит 50 % плагиоклаза, 35 % амфибола, 8 % хлорита. В этих образцах преимущественное направление микротрещин образует некоторый угол с преобладающей ориентацией элементов кристаллоакустической симметрии.

Акустополярнограммы некоторых образцов (обр. h009, ось 3—3'; h023, ось 1—1', 2—2'; h030, ось 1—1', 2—2'; h031, ось 1—1') отличает аномально большие и округленной формы диаграммы ВС. Как показано ранее [Горбацевич, 1990], такие формы акустополярнограмм наблюдаются в случае, если в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, кристаллоакустические оси минеральных зерен распределены в широком диапазоне углов. В этом случае проявляется эффект деполяризации сдвиговых волн. Существенное проявление этого эффекта в образцах апоэклогитового и хлоритизированного гранатового амфиболита (обр. h009, h030) объясняется наибольшим числом разнородных минералов в составе породы.

На форму акустополярнограмм образцов также влияют неоднородности и разноориентированная микротрещиноватость. Несимметричная, угловатая форма акустополярнограмм ВП образцов h009, h030, h031 свидетельствует о существенном влиянии этих факторов на их упругоанизотропные свойства. Наименьшее влияние неоднородностей наблюдается в образцах биотитового (h003), гранатового (h014) и оруденелого гранатового хлоритизированного (h028) амфиболитов с довольно строгой однонаправленной ориентировкой кристаллоакустических направлений в минеральных зернах.

В целом сравнение очертаний акустополярнограмм разных типов пород (см. рис. 4), показывает, что их форма не позволяет отличить амфиболиты от гранатовых амфиболитов или от амфиболовых роговообманковых гнейсов. Таким образом, упругоанизотропный облик этих пород определяется не минеральным составом, а конкретными палеогеодинамическими условиями формирования при метаморфических и иных процессах.

Обзор матриц V_{ij} показывает (см. табл. 2), что каждая из скоростных характеристик пород содержит определенную (детерминированную) и некоторую случайную (флуктуационную) составляющие. Наибольшие значения

скорости распространения продольных и поперечных волн зарегистрированы в образце гранатового амфиболита (обр. h010, $V_P=6,15$ км/с, $V_S=3,64$ км/с), наименьшие — в образце амфиболита (обр. h030, $V_P=4,5$ км/с, $V_S=2,5$ км/с).

Максимальная скорость распространения продольных и поперечных колебаний в образцах h005, h014, h031 наблюдается в направлении 1—1'. В этих образцах отмечаются отношения $V_{11} > V_{22} > V_{33}$. Такое соотношение сохраняется и для образца h030, но с тем отличием, что максимальная величина V_S наблюдается в направлении 2—2'. Эту группу образцов можно отнести к орторомбическому типу симметрии. Этот тип симметрии характеризуется, по меньшей мере, двумя взаимно ортогональными плоскостями симметрии [Продайвода, 1978; Александров, Продайвода, 2000]. В изучаемых 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 (слюда, амфибол и др.). Строгое соответствие орторомбической симметрии могло быть зафиксировано, если бы в матрице V_{ij} наблюдалось, например, соотношение

$$\begin{aligned} V_{11} > V_{22} > V_{33}, \\ V_{12} = V_{21} > V_{13} = V_{31} > V_{23} = V_{32}. \end{aligned} \quad (6)$$

Другая группа образцов имеет иное соотношение величин скорости продольных колебаний (см. табл. 2). У образца h012 отмечается соотношение $V_{11} > V_{33} > V_{22}$, при котором максимальная скорость V_P отмечается при прохождении колебаний в направлении 1—1'. В ряде образцов наблюдается следующие отношения в матрице V_{ij} : $V_{11} \approx V_{22} > V_{33}$ (обр. h009); $V_{11} = V_{22} > V_{33}$ (обр. h023, h028); $V_{22} \sim V_{11} > V_{33}$ (обр. h003); $V_{22} > V_{33} \sim V_{11}$ (обр. h001, h010); $V_{22} > V_{33} \sim V_{11}$ (обр. h001, h010); $V_{22} > V_{33} = V_{11}$ (обр. h025); $V_{33} = V_{11} > V_{22}$ (обр. h007). Такие соотношения могут свидетельствовать о близости к поперечно-изотропному типу симметрии данных образцов (обр. h028, h031). Однако акустополяриграммы образцов h001, h003, h007, h009, h010, h023, h025 показывают наличие проекций элементов симметрии на всех трех гранях и соответственно при более строгом подходе их следует отнести к орторомбическому типу симметрии [Горбачевич, 1995]. В итоге только три образца можно отнести к поперечно-изотропному типу упругой симметрии.

Ранее было обнаружено, что глубинные породы, вынесенные на земную поверхность,

испытывают разуплотнение с образованием разгрузочных микротрещин [Горбачевич и др., 1992; Горбачевич, Медведев, 1986]. Для того чтобы значения скорости, полученные на разгруженных образцах, были близки к значениям, когда порода находилась на глубине, нами рассчитаны средние значения этих скоростей по минеральному составу. Расчеты выполнены по формуле [Беликов и др., 1970]

$$\ln V_k = \frac{\sum \ln V_i P_i}{\sum P_i}, \quad (7)$$

где V_k — средняя расчетная скорость в породе, V_i — средняя скорость в каждом минерале, P_i — доля минерала в породе.

По аналогичной формуле рассчитаны плотности тех же образцов:

$$\rho_c = \frac{\sum \rho_i P_i}{\sum P_i}, \quad (8)$$

где ρ_c — средняя расчетная плотность породы, ρ_i — плотность каждого минерала, P_i — доля минерала в породе.

В табл. 3 даны рассчитанные по формуле (7) значения V_{PCP} , V_{SCP} , ρ_c . Дополнительно рассчитаны коэффициенты $K_P = (V_{PCP} - V_{PC}) / V_{PCP}$, $K_S = (V_{SCP} - V_{SC}) / V_{SCP}$, $K_\rho = (\rho_c - \rho_P) / \rho_c$, позволяющие оценить насколько микротрещиноватость снижает значения скорости продольных, поперечных волн и плотности в образцах при измерениях в лабораторных условиях. На рис. 5 приведен график изменений плотности в отрезке 4,1—7,1 км скважины КТВ-НВ, рассчитанной по минеральному составу (ρ_c) и экспериментально замеренной (ρ_P). Между расчетными и экспериментальными значениями наблюдается корреляция с величиной достоверности $R^2=0,53$. В некоторых случаях экспериментально измеренные значения меньше расчетных на 12 %.

Данные табл. 3 и рис. 5 показывают, что расчетные плотности ($\rho_c=3,03$ г/см³) в целом отличаются от замеренных экспериментально на образцах при атмосферном давлении и температуре ($\rho_P=2,85$ г/см³). Это отличие составляет примерно 6 %. Для 13 образцов керна скважины КТВ-НВ $V_{PCP}=6,02 \div 7,21$, $V_{SCP}=3,41 \div 4,07$ км/с (средние значения 6,66 и 3,76 км/с соответственно). Результаты, приведенные в табл. 3, позволяют заметить, что микротрещины, возникающие при разгрузке керна от литостатических напряжений в массиве, существенным образом влияют на значения экспериментально измеренных продольных и поперечных скоростей.

Таблица 3. Расчетные значения скорости продольных и поперечных волн, плотности некоторых образцов пород из разреза немецкой сверхглубокой скважины КТВ-НВ

Номер образца	Глубина, м	V_{PCP} , км/с	V_{SCP} , км/с	Плотность ρ_c , г/см ³	V_{PCE} , км/с	K_P , %	K_S , %	$K_{P'}$, %
h001	4149	6,06	3,43	2,75	5,80	16	11	2
h003	4251	6,78	3,76	3,10	5,75	30	20	7
h005	4447,2	6,95	3,94	3,21	6,10	28	23	4
h007	4592,3	6,82	3,77	2,99	5,95	25	16	6
h009	4684,7	6,70	3,77	3,03	5,90	19	13	5
h010	4820	6,53	3,64	2,90	5,30	13	5	-1
h012	5082	6,68	3,72	2,98	5,70	25	19	5
h014	5378	6,75	3,81	3,14	6,40	18	12	8
h023	6148,2	7,04	3,89	3,15	5,80	27	23	8
h025	6244,7	6,99	3,94	3,10	6,10	33	22	7
h028	6434,5	7,21	4,07	3,33	—	31	25	12
h030	6668	6,61	3,68	2,98	—	41	35	10
h031	7011,3	6,09	3,52	2,80	—	11	7	3
h033	7400,3	6,02	3,41	3,02	6,20	—	—	—
Среднее		6,66	3,76	3,03	5,88	24	18	6

Примечание: V_{PCP} , V_{SCP} — средние скорости продольных и поперечных волн соответственно; V_{PCE} — скорость продольных волн вдоль оси скважины КТВ-НВ [Emmermann et al., 1995].

Разница между расчетными значениями V_{PCP} и экспериментальными V_{PC} в среднем составляет 24 %, между V_{SCP} и V_{SC} — 18 %.

На рис. 6 представлены результаты экспериментальных (V_{PC} , V_{SC}) и расчетных (V_{PCP} , V_{SCP}) данных в интервале глубин 4,1—7,1 км. Различия между средними значениями скорости V_{SC} и V_{SC0} практически отсутствуют. Расчетные значения V_{SCP} отличаются от экспериментальных в большую сторону за счет эффектов, связанных с образованием микротрещин в разгруженных образцах. Соответственно точки V_{SCP} образуют более «гладкую» линию, чем экспериментальные. Взаимное соотношение значений V_{PCP} , V_{PC} и V_{PC0} аналогично. Однако разрыв в значениях V_{PCP} , с одной стороны, и V_{PC} , V_{PC0} , с другой, более значителен, чем наблюдаемый на поперечных волнах. Резкое снижение экспериментальных значений продольных и поперечных скоростей на глубине 6434,5 м связано с увеличенной пористостью пород на этой отметке [Berckhemer et al., 1997].

Представленные в табл. 2 и на рис. 7 результаты определений коэффициента анизотропии A_P и показателя B_S (формулы (3), (5)) показывают, что оценка упругой анизотропии

по продольным и поперечным волнам дает сходные результаты. Отмечается корреляция между коэффициентом анизотропии A_P и показателем B_S с величиной достоверности $R^2=0,17$. Величины A_P , B_S находятся в диапазоне 3,9—23,9 %. Эти коэффициенты обнаруживают тенденцию к увеличению с ростом глубины. Наиболее анизотропны, если судить по значениям A_P и B_S , образцы амфиболита h023, h030 и амфиболового роговообманкового гнейса h031. Наименьшую анизотропию проявляют образцы амфиболитов h005, h010 и h028. Полученные показатели анизотропии указывают на необходимость их учета при сейсмическом моделировании условий распространения волн в реальных массивах метаморфических пород.

Дискуссия. Данные о пористости, скорости распространения продольных и поперечных волн, измеренные на образцах и в массиве до глубины 4 км скважины КТВ (см. рис. 1), позволяют сравнить свойства пород этой части разреза со свойствами участка 4,1—7,1 км разреза скважины КТВ-НВ (см. табл. 2, 3; рис. 5—7). Однако данные, полученные в лабораторных условиях, не соответствуют *PT*-условиям *in situ*.

Рассчитанные по минеральному составу

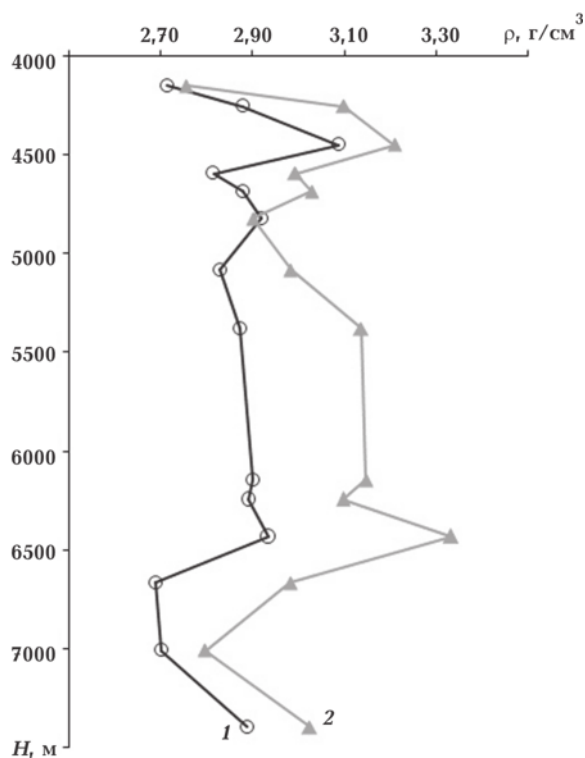


Рис. 5. Изменения экспериментально измеренной ρ_P (1) и рассчитанной ρ_c (2) плотности в диапазоне глубин 4,1—7,1 км скважины КТВ-НВ.

значение плотности, скорости распространения продольных (V_{PCP} , V_{PCE}) и поперечных (V_{SCP}) волн являются более близкими (чем экспериментальные) к тем, которые определяются в породах при PT -условиях [Головатая и др., 2006]. Тем не менее необходимо рассмотреть величины поправок на реальные давление и температуру земных глубин. Согласно данным [Brudy et al., 1997], усредненное напряжение (включая вертикальную составляющую, среднее по максимальной и минимальной компонентам горизонтальных напряжений) для интервала глубин 4,1—7,1 км скважины КТВ-НВ составляет 110—190 МПа. Перепад температур для этих глубин примерно равен 90—170 °С [Clauser et al., 1997]. Оценка плотностных и скоростных характеристик пород для PT -условий КТВ-НВ может быть выполнена по результатам изменений свойств образцов при моделировании нагрева и нагружения на специальных установках [Головатая и др., 2006]. Подобное моделирование производилось на установках в г. Киль (Германия), позволяющих создавать всесторонние давления до 600 МПа и температуры до 600 °С [Kern et al., 1997; Kern, Poppe, 2000] на образцах ядра СГ-3 и образцах-аналогах, отобранных с земной

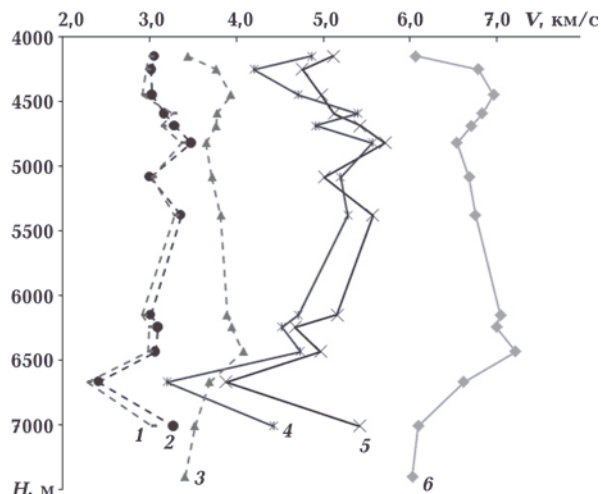


Рис. 6. Значения скорости распространения продольных и поперечных волн в диапазоне глубин 4,1—7,1 км в скважине КТВ-НВ: 1 — поперечные волны в направлении оси скважины (V_{SCO}); 2, 3 — поперечные волн (2 — V_{SC} , 3 — V_{SCP}); 4, 5 — экспериментальные значения скорости распространения продольных волн (4 — V_{PCO} , 5 — V_{PC}); 6 — расчетные (V_{PCP}).

поверхности. Было показано, что увеличение давления повышает значения плотности ρ и скоростей V_P , V_S амфиболсодержащих пород, подобных образцам КТВ. Повышение температуры, наоборот, понижает эти величины. При нагружении образцов выделяются два участка повышения значений плотности ρ , скоростей V_P и V_S — нелинейный и квазилинейный. На нелинейном участке в процессе повышения давления в образце происходит закрытие микротрещин. В пределах квазилинейного участка рост плотности и скорости происходит за счет деформаций кристаллической основы породы [Kern et al., 2001; Christensen, 1985; Лебедев и др., 1986; Корчин, 2007]. Согласно результатам моделирования, зависимость изменений плотности таких образцов выражается формулой [Головатая и др., 2006]

$$r(P, t) = (r_c + \beta P)[1 - \gamma(t - 20)], \quad (9)$$

где β , γ , — коэффициенты пропорциональности.

По формуле (9) можно рассчитать плотность породы при глубинных PT -условиях. Для образцов с минеральным составом, сходным образцам КТВ-НВ, средние значения коэффициентов равны: $\beta = 2,81 \cdot 10^{-5}$ г/(см³·МПа), $\gamma = 2,3 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹ [Головатая и др., 2006].

С учетом данных табл. 3 подсчеты по формуле (9) для верхнего (110 МПа, 90 °С) и нижнего (190 МПа, 170 °С) участков разреза КТВ-НВ показали, что средняя величина плотности

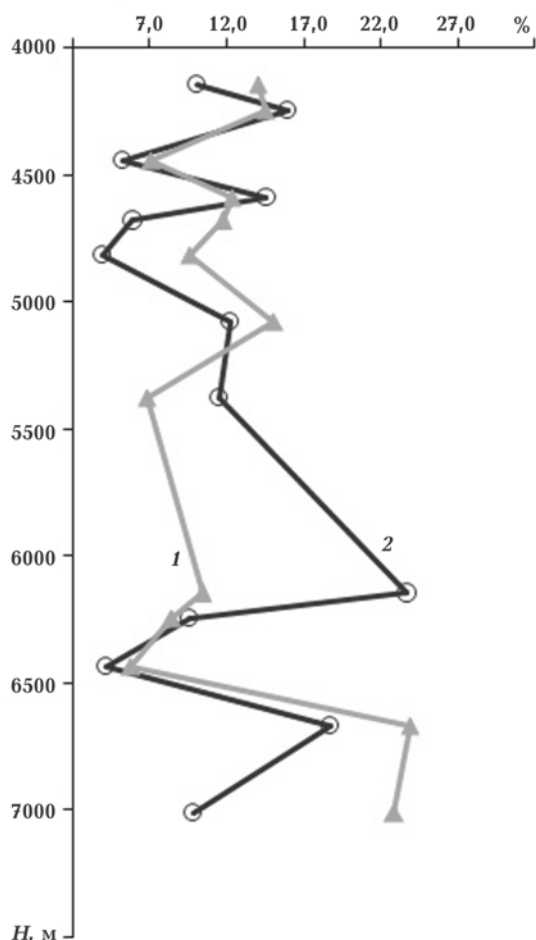


Рис. 7. Изменения упругой анизотропии, рассчитанной по отношению значений скорости распространения продольных (1) и поперечных (2) волн в диапазоне глубин 4,1—7,1 км в разрезе скважины КТВ-НВ.

($\rho_c=3,03 \text{ г/см}^3$, табл. 3) с поправкой на PT -условия должна быть на глубине 4,1 км равна $3,03 \text{ г/см}^3$, а на глубине 7,1 км — $3,02 \text{ г/см}^3$, т. е. поправки на PT -условия глубин незначительны и могут не учитываться.

Поправки на глубинные условия для значений скорости рассчитываются по формуле, аналогичной (9):

$$V(P, t) = (V_0 + \beta P)[1 - \gamma(t - 20)]. \quad (10)$$

Для этих же образцов [Головатая и др., 2006] средние значения коэффициентов для V_P равны: $\beta_P=2,5 \cdot 10^{-4} \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$; $\gamma_P=4,6 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$; для V_S — $\beta_S=0,7 \cdot 10^{-4} \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{МПа}^{-1}$; $\gamma_S=2,7 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$. Согласно расчетам по формуле (10), средние значения скорости для глубины 4,1 км — $V_P=6,79 \text{ км/с}$, $V_S=3,69 \text{ км/с}$, для глубины 7,1 км — $V_P=6,55 \text{ км/с}$, $V_S=3,61 \text{ км/с}$.

Наблюдается некоторое снижение значений скорости с увеличением глубины залегания

породы. Эта тенденция связана с тем, что повышение температуры приводит к снижению скорости распространения волн в большей степени, чем повышение этого параметра при увеличении давления [Лебедев и др., 1986; Корчин, 2007].

В целом, согласно данным табл. 3 и поправок на PT -условия, для интервала глубин 4,1—7,1 км значения плотности пород находятся в пределах $2,75\text{—}3,33 \text{ г/см}^3$, скорости — $V_P=6,0\div 7,1 \text{ км/с}$, $V_S=3,3\div 4,0 \text{ км/с}$. Анализ данных табл. 1—3 позволяет сделать вывод, что главным фактором, влияющим на вариации плотности и скоростных характеристик пород КТВ-НВ, является их минеральный состав. По сравнению со значениями скорости распространения продольных и поперечных волн, измеренных на образцах и по каротажу до глубины 4 км, данные, полученные нами, несколько отличаются в большую сторону (см. рис. 1). Результаты, полученные методами акустического каротажа и ВСП в скважине КТВ-НВ [Berckhemer et al., 1997; Smithson et al., 2000], также близки к нашим данным. Для разреза Кольской сверхглубокой скважины, с небольшими вариациями, $V_P=6,2 \text{ км/с}$, $V_S=3,6 \text{ км/с}$ по всей глубине 9—12261 м [Кольская ..., 1998; Строение ..., 2005]. Таким образом, средние значения скорости V_P и V_S для более древних протерозойских и архейских пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), полученные методом АК и ВСП, имеют меньшие значения, чем те же характеристики КТВ-ВВ и КТВ-НВ.

Анализ данных (см. рис. 3, табл. 2) позволяет отметить, что акустическая анизотропия пород отрезка 4,1—7,1 км скважины КТВ-НВ определяется ориентированным расположением кристаллоакустических элементов симметрии минеральных зерен и микротрещин в породе. Эффект линейной акустической анизотропии поглощения позволяет определить преимущественное направление микротрещин и выделить именно их влияние на анизотропию породы [Горбацевич, 1995].

На образцах керна КТВ-НВ выявлены такие же новые явления: линейная акустическая анизотропия поглощения и деполаризация сдвиговых волн, которые впервые были обнаружены на образцах Кольской сверхглубокой скважины [Кольская ..., 1998]. Полученные нами данные для отрезка 4,1—7,1 км подтверждают ранее сделанный вывод о существенной анизотропии физических свойств пород по разрезу КТВ-ВВ и КТВ-НВ [Emmermann et al., 1995].

Выводы. Из результатов петрографического изучения пород, акустополарископии, определений плотности, скорости распространения продольных и поперечных волн, упругой анизотропии следует, что на физические характеристики пород в разрезе скважины КТВ-НВ в наибольшей степени влияют вариации минерального состава, неоднородности, пористости, упругой анизотропии, анизотропии поглощения, связанной с направленным расположением микротрещиноватости.

По данным акустополарископии и скоростным характеристикам породы КТВ-НВ преимущественно представлены орторомбическим типом симметрии. Сравнение очертаний акустополариграмм разных типов пород и их коэффициентов анизотропии показывает, что упругоанизотропный облик пород КТВ-НВ определяется в большей мере не минеральным составом, а конкретными палеогеодинамическими условиями формирования при метаморфических и иных процессах.

Для интервала глубин 4,1—7,1 км значения плотности пород находятся в пределах 2,75—3,33 г/см³, скорости — $V_P=6,0\div 7,1$ км/с, $V_S=3,3\div 4,0$ км/с (средние значения 3,0 г/см³, 6,7 км/с, 3,65 км/с соответственно). Наши дан-

ные по КТВ-НВ несколько отличаются в большую сторону по сравнению с результатами, полученными в верхней части массива (КТВ-ВВ, до четырех километров). Наши результаты и определенные методами акустического каротажа и ВСП в скважине КТВ-НВ близки между собой.

На образцах керна КТВ-НВ выявлены: линейная акустическая анизотропия поглощения, деполяризация сдвиговых волн, угловое несогласие элементов симметрии эффекта ЛААП с элементами упругой симметрии. Эти явления были впервые обнаружены на образцах Кольской сверхглубокой скважины. Все изученные образцы скважины КТВ-НВ являются упругоанизотропными. Коэффициенты анизотропии, определенные по продольным и поперечным волнам, находятся в диапазоне 4—24 %. Эти коэффициенты коррелируют между собой и показывают тенденцию к увеличению с ростом глубины.

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

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты №№ 07-05-00100а, 10-05-00082-а.

Список литературы

- Александров К. С., Продайвога Г. Т. Анизотропия упругих свойств минералов и горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 354 с.
- Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. — Москва: Наука, 1970. — 276 с.
- Головатая О. С., Горбацевич Ф. Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении PT -параметров // Физика Земли. — 2006. — № 8. — С. 1—12.
- Горбацевич Ф. Ф. Акустополарископия горных пород. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. — 204 с.
- Горбацевич Ф. Ф. Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2002. — 140 с.
- Горбацевич Ф. Ф. Анизотропия поглощения сдвиговых колебаний в горных породах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. — 1990. — № 5. — С. 70—79.
- Горбацевич Ф. Ф., Ильченко В. А., Головатая О. С., Смирнов Ю. Р., Керн Х., Попп Т., Смитсон С., Ай Е., Христенсен Н. Упругие свойства некоторых образцов пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины, определенные при атмосферных условиях и условиях *in situ* // Физика Земли. — 2002. — № 7. — С. 46—55.
- Горбацевич Ф. Ф., Мегвегев Р. В. Механизм разуплотнения кристаллических горных пород при их разгрузке от напряжений // Рудные геофизические исследования на Кольском полуострове. — Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1986. — С. 83—89.
- Горяинов П. М., Давиденко И. В., Горбацевич Ф. Ф., Ланев В. С., Мегвегев 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: Изд-во КНЦ АН СССР, 1992. — С. 136—144.
- Ковалевский М. В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс Acoustpol: Учеб. пособие. — Апатиты: ООО «К & М», 2009а. — 54 с.
- Ковалевский М. В. Акустополаризационные эффекты горных пород // Тр. Всерос. (с международным участием) науч. конф. «Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов»,

- 28—30 сентября 2009 г. — Апатиты: Изд. Геолог. ин-та КНЦ РАН, 2009б. — С. 126—129.
- Ковалевский М. В. К вопросу о совершенствовании методики исследований упругих характеристик геоматериалов методом акустополарископии // Информ. матер. 12-й науч. конф. «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента». — Сыктывкар: Геопринт, 2003. — С. 123—125.
- Ковалевский М. В. К вопросу оценки эффекта линейной акустической анизотропии поглощения в задачах акустополарископии // Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геозкологии: Матер. XXI молодежной науч. конф., посвященной памяти К. О. Кратца, г. Санкт-Петербург, 18—25 октября 2010 г. — Санкт-Петербург: Изд-во ИГГД РАН, 2010. — С. 30—34.
- Ковалевский М. В., Головатая О. С., Горбацевич Ф. Ф. Автоматический акустополарископ для измерения упругих и неупругих параметров твердых сред // Сб. тр. XI сессии РАО. Т. 2. — Москва: Геос, 2001. — С. 117—121.
- Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыты исследования. — Москва: МФ «Технонефтегаз», 1998. — 260 с.
- Корчин В. А. Структурные особенности минеральной среды в РТ-условиях различных глубин земной коры // Геофиз. журн. — 2007. — **29**, № 3. — С. 49—77.
- Лебедев Т. С., Корчин В. А., Савенко Б. Я., Шаповал В. И., Шепель С. И. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. — Киев: Наук. думка, 1986. — 200 с.
- Продайвога Г. Т. Принципы симметрии в петрофизике // Геолог. журн. — 1978. — **38**, № 4. — С. 61—69.
- Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н. В. Шарова, Ф. П. Митрофанова, М. Л. Вербы, К. Гиллена. — Петрозаводск: Изд-во КНЦ РАН, 2005. — 318 с.
- Berckhemer H., Rauен A., Winter H., Kern H., Kontny A., Lienert M., Nover G., Pohl J., Popp T., Shult A., Soffel H. C. Petrophysical properties of the 9-km deep crustal section at KTB // J. Geophys. Res. — 1997. — **102**(B8). — P. 18337—18361.
- Brudy M., Zoback M. D., Fuchs K., Rummel F., Baumgärtner J. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implication for crustal strength // J. Geophys. Res. — 1997. — **102** (B8). — P. 18453—18475.
- Christensen N. I. Measurements of dynamic properties of rock at elevated temperatures and pressures // Measurement of rock properties at elevated pressures and temperatures. — Philadelphia: Amer. Soc. Testing and Materials, 1985. — P. 93—107.
- Clauser C., Giese P., Huenges E., Kohl T., Lehmann H., Rybach L., Šafanda J., Wilhelm H., Windloff K., Gustav Z. The thermal regime of the crystalline continental crust: Implications from the KTB // J. Geophys. Res. — 1997. — **102**(B8). — P. 18417—18441.
- Emmerrmann R., Althaus E., Giese P., Stockhert B. KTB Hauptbohrung. Results of Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory. Final Report: 0-9101m. KTB Report 95-2. — Hannover, 1995.
- Emmerrmann R., Lauterjüng J. The German Continental Deep Drilling Program KTB: Overview and major results // J. Geophys. Res. — 1997. — **102**(B8). — P. 18179—18201.
- Kern H., Liu B., Popp T. Relationship between anisotropy of P- and S-wave velocities and anisotropy of attenuation in serpentinite and amphibolite // J. Geophys. Res. — 1997. — **102**. — P. 3051—3065.
- Kern H., Popp T. P- and S-wave velocities and velocity anisotropy of core samples from the Kola SD-3 superdeep and their surface analogues at PT conditions // The results of the study of the deep substance and physical processes in the Kola superdeep borehole section down to a depth of 12261 m / Eds. F. P. Mitrofanov, F. F. Gorbatshevich. — Apatity: Poligraph, 2000. — P. 117—121.
- Kern H., Popp T., Gorbatshevich 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. — **338**. — P. 113—134.
- Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // Amer. Mineral. — 1983. — **68**. — P. 277—279.
- Smithson S. B., Wenzel F., Ganchin Y. V., Morozov I. B. Seismic results at Kola and KTB deep scientific boreholes: velocities, reflections, fluids, and crustal composition // Tectonophysics, — 2000. — **329**. — P. 255—276.