

Температуры гидротермально – метасоматических процессов, приведших к образованию новых генераций цирконов, можно оценить из следующих данных: как благородные газы, так и азот в шунгитовом веществе изотопно фракционированы с обогащением легкими изотопами [2, 7]. Это возможно в условиях двухфазной системы жидкость – газ, с последующим захватом в углеродистое вещество компонентов из газовой фазы. Следовательно, метасоматический флюид был подкритическим, и его температура не превышала 250-270 °С. При этих низкотемпературных процессах различные этапы маркировались кристаллизацией соответствующей генерации цирконов, благодаря тому, что цирконий весьма мобилен в обстановке углекислого флюида [5]. Таким образом, флюидонасыщенные углеродистые породы людиковия являются своеобразным детектором, чутко фиксирующим эндогенные процессы, протекающие на значительной глубине, и соответственно имеющие весьма незначительный термальный отклик в приповерхностных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андерсон Е.Б., Заславский В.Г., Никитин С.А., и др. Изотопное датирование урановой минерализации в рамках 3-этапной модели с использованием селенидов висмута и свинца в качестве «вторичных» геохронометров. В кн. Современные данные изотопной геохимии и космохимии. Л., Наука. 1985, с. 82-91.
2. Верховский А.Б., Прасолов Э.М., Лохов К.И., и др. Изотопные характеристики углеродсодержащих пород базальной части средней подсвиты Заонежской свиты. // Тез. Докл. XVII Симпозиума по геохимии изотопов, Москва 6-9 декабря 2004г., М., ГЕОХИ, 2004, с.45-46.
3. Лохов К.И., Астафьев Б.Ю., Воинова О.А., Матуков Д.И., Антонов А.В., Прасолов Э.М., Прилепский Э.Б., Богомолов Е.С. Возраст и генезис раннедокембрийской графитовой минерализации лапландского гранулитового пояса (Кольский полуостров). // Региональная геология и металлогения, 2006, 28, с. 89-100.
4. Лохов К.И., Бережная Н.Г., Матуков Д.И., и др. Фанерозойские значения возраста в породах Балтийского щита по U-Pb методу по цирконам при помощи методики SHRIMP: контаминация проб или реальность? Тез. Докл. XVII Симпозиума по геохимии изотопов, Москва 6-9 декабря 2004г., М., ГЕОХИ, 2004, с.155-156.
5. Лохов К.И., Прасолов Э.М., Капитонов И.Н., Кузьмин В.К., Родионов Н.В., Богомолов Е.С., Сергеев С.А. Изотопная геология раннедокембрийских кальцифиров Охотского массива, (С.В. России). // Региональная геология и металлогения, 2008, в печати.
6. Полеховский Ю.С., Голубев А.И. Людиковийский надгоризонт Онежского прогиба // Проблемы стратиграфии нижнего протерозоя Карелии. Петрозаводск. Кар.ФАН СССР, 1991, с.106-117.
7. Lokhov K.I., L.K.Levsky, F. Begemann Volatile components in Karelian shungites as indicators of composition of Proterozoic atmosphere. // Astrobiology in Russia. Proceedings of the Workshop. St.Petersburg, Russia, 23-29 March, 2002. Russian astrobiology Center 2002, p.112-115.
8. Zircon. Eds. J.M. Hanchar and W.O. Hoskin. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. The Mineralogical Society of America, 2003, v.53, 500 p.

ОСОБЕННОСТИ СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ И ГЛУБИННЫХ ПОРОД (по результатам исследования керна сверхглубоких скважин)

Горбачев Ф.Ф., Головатая О.С.

Геологический институт Кольского НЦ РАН, г. Апатиты, gorch@geoksc.apatity.ru

Исследования физических свойств приповерхностных и глубинных образцов пород по разрезам Кольской (СГ-3), Уральской (СГ-4), немецкой (КТВ) и финской (ОДВ) исследовательских скважин позволяют оценить основные факторы, влияющие на тенденции изменения характеристик кристаллических пород коры с глубиной. Изучение сейсмических свойств глубинных пород по образцам керна скважин представляет собой определенные трудности, так как при выбуривании и подъеме керна на земную поверхность, эти характеристики претерпевают существенные изменения. В частности, в образце, при освобождении его от литостатических и тектонических напряжений образуются системы микротрещин, искажающие упругие параметры пород по сравнению с теми, которыми образец обладает в условиях залегания [1]. В качестве примера, на рис. 1 приведены графики величин продольной (V_p) и сдвиговой (V_s) скорости распространения волн, измеренных – $V_p(e)$, $V_s(e)$ – в керна финской скважины Оутокумпу и рассчитанных $V_p(p)$, $V_s(p)$ в тех же образцах по минеральному составу. Как можно заметить, расчетные величины V_p и V_s практически не изменяются с глубиной, но экспериментально измеренные обнаруживают тенденцию снижения с увеличением глубины. Расхождение экспериментальных и расчетных V_p и V_s , отмечаемое в верхней части графика можно объяснить за счет механизма выветривания приповерхностных пород.

Из-за эффекта разуплотнения и изменения температурных условий, величины скорости распространения упругих колебаний в разгруженных от литостатического давления глубинных образцах Кольской сверхглубокой скважины значительно ниже, чем в породах *in situ* [2]. Моделирование РТ-условий земных глубин при испытаниях образцов позволяет получить характеристики упругих свойств, адекватные глубинным. На рисунке 2 приведены типичные зависимости скорости распространения продольных волн от давления и температуры для приповерхностных и глубинных образцов [3]. Два образца – метаморфизованный аркозовый песчаник (P5) и биотитовый плаггиогнейс (PP363) были отобраны на земной поверхности. Образец № 31115 – кварц-плаггиоклазовый амфиболит – изготовлен из керна СГ-3, глубина извлечения 8718 м. Образец биотит-роговообманкового гнейса (36058) был извлечен с глубины 9571 м. В соответствии с методикой определений, образцы кубической формы вначале нагружали всесторонним давлением до 600 МПа. Затем при давлении 600 МПа их нагревали до 600 °С.

Как следует из данных рис. 2, на начальном этапе нагружения приповерхностные и глубинные образцы деформируются нелинейно, что обусловлено закрытием микротрещин под действием давления. Графики зависимостей величин продольной (V_p) и сдвиговой (V_s) скорости имеют нелинейный и линейный участки. В пределах нелинейного участка при нагружении происходит закрытие пор и микротрещин. На линейном участке деформируется кристаллическая основа породы. Из сравнения графиков деформирования приповерхностных и глубинных пород следует, что глубинным образцам свойственны более низкие значения величин V_p и V_s при начальных нагрузках. Это означает, что в образцах, извлеченных со значительных глубин более развита микротрещиноватость. Большое число микротрещин возникает при разгрузке керна при его выбуривании и извлечении на поверхность. Зависимости V_p и V_s при повышении температуры, рис. 2, имеют монотонный характер. С ростом температуры величины скорости продольных и сдвиговых волн снижаются, в общем, одинаково, как для приповерхностных, так и для глубинных пород.

При испытаниях приповерхностных и глубинных образцов установлено что, в пределах нелинейного участка деформирования (до давления 150-200 МПа) величины скорости распространения продольных и поперечных волн в глубинных образцах возрастают в 1.6-1.7 раз [4]. Величины скорости в поверхностных образцах на том же участке вырастают, в среднем, не более чем на 10%. На квазилинейном участке градиент повышения скорости в глубинных образцах при росте давления, в среднем, составляет ~1.7% на 100 МПа (для продольных волн) и ~1.3% (для поперечных). Для поверхностных образцов тот же градиент составляет ~0.04% и ~0.02% соответственно. Нагрев породы как отобранной на поверхности, так и глубинной, снижает на каждые 100°С скорость продольных и поперечных волн на ~0.7-0.8%. Зависимости плотности и скорости распространения упругих волн от давления и температуры выражаются следующими выражениями:

$$\rho(P, t) = [\alpha \cdot \rho_0 + \beta \cdot P - \rho_0(\alpha - 1) \cdot e^{-P/\tau}] \cdot [1 - \gamma(t - 20)], \quad (1)$$

$$V(P, t) = [\alpha \cdot V_0 + \beta \cdot P - V_0(\alpha - 1) \cdot e^{-P/\tau}] \cdot [1 - \gamma(t - 20)], \quad (2)$$

где P – давление в МПа; t – температура, °С; ρ_0 – плотность, измеренная при лабораторных условиях; α – коэффициент, учитывающий поправку к плотности (скорости) на нелинейном участке деформирования; β – коэффициент, отражающий линейное изменение ρ (V) при возрастании всестороннего давления P ; τ – релаксационный параметр, определяющий степень изменения ρ (V) с ростом давления; γ – коэффициент снижения ρ (V) с ростом температуры; V_0 – величина скорости (км/с), измеренная при лабораторных условиях.

Расчеты по формулам (1) и (2) для конкретных условий *in situ* разреза Кольской сверхглубокой скважины показали, что с увеличением глубины происходит слабое падение величин скорости, как V_p так и V_s . Этот, казалось бы, парадоксальный результат объясняется общим снижением объемной плотности пород в разрезе и влиянием роста температуры с глубиной [4].

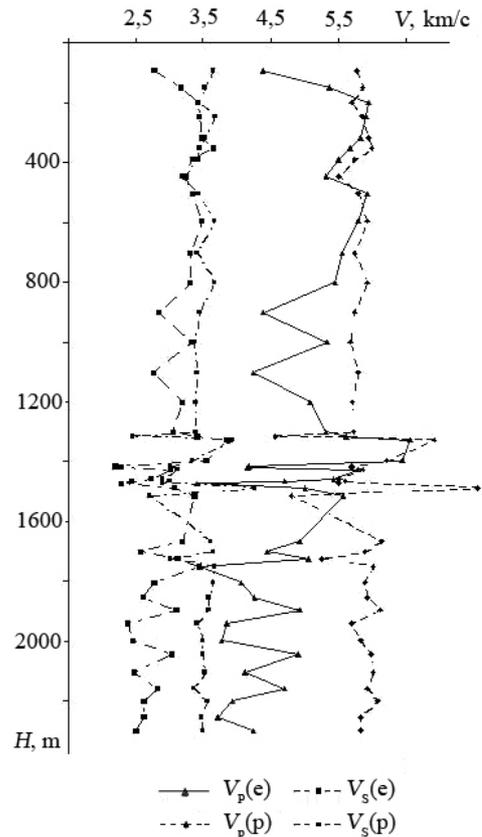


Рис. 1. Средние величины V_p и V_s в образцах скважины Оутокумпу определенные экспериментально – $V_p(e)$, $V_s(e)$ и расчетом – $V_p(p)$, $V_s(p)$, по минеральному составу пород

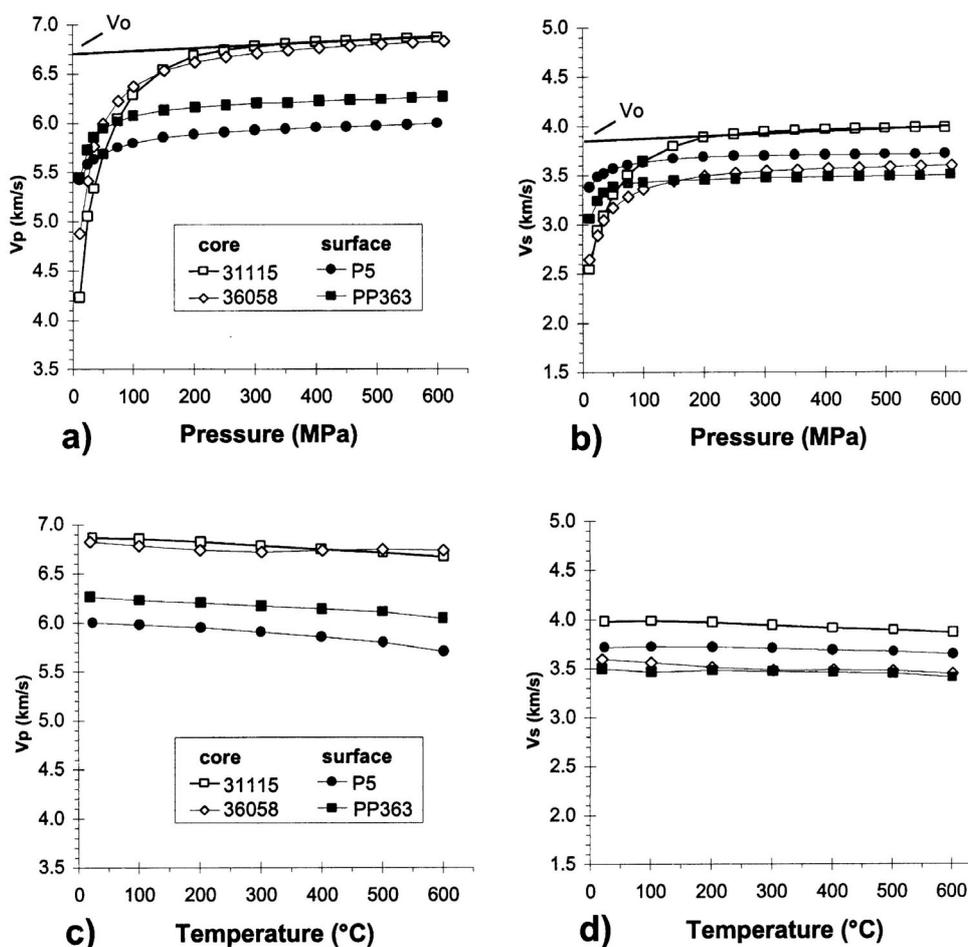


Рис. 2. Средние величины скорости продольных V_p и сдвиговых V_s волн некоторых приповерхностных и глубинных образцов в зависимости от давления (а), (b) и температуры (с), (d) [3].

Образцы P5 и PP363 отобраны на земной поверхности. Образцы 31115 и 36058 изготовлены из керна Кольской СГ-3

Анализ данных показал, что механизм передачи упругих возмущений в микротрещиноватой породе одинаков как для продольных, так и для сдвиговых волн. Однако в породе, находящейся под давлением, при котором микротрещиноватость не оказывает существенного влияния на скорость распространения колебаний, прирост скорости продольных волн с увеличением глубины происходит быстрее, чем поперечных.

Особо следует отметить роль упругой анизотропии как одного из параметров, характеризующих свойства глубинных пород. Способ оценки тенденции изменения средних величин скорости распространения продольных и поперечных волн с возрастанием глубины не всегда пригоден для сугубо анизотропных пород. Как показал опыт изучения разреза СГ-3, большая часть образцов метаморфизованных пород, вскрытых этим разрезом, обладает анизотропией упругих свойств [5]. Упругая анизотропия существенным образом влияет на процессы распространения сейсмических колебаний в земной коре. Параметры анизотропии на разгруженных, извлеченных из значительной глубины образцов, не соответствуют тем, которые присущи породам в массиве [3].

Характеристики анизотропии в зависимости от приложенной всесторонней нагрузки в поверхностных и глубинных образцах приведены в работах [3, 4]. Результаты расчета коэффициента анизотропии A_p представлены на рис. 3. Согласно данным рис. 3 наблюдается, в целом, существенное снижение показателя A_p для глубинных пород при возрастании давления. Например, для образцов 43560, 43726 коэффициент A_p изменяется при повышении давления в десятки раз. Для образцов 31115, 36058 он изменяется более чем в 3 раза. Причем, самое большое изменение этого параметра происходит в диапазоне нагрузок 1-100 МПа. Слабую анизотропию, сравнительно мало меняющуюся при возрастании нагрузки (рис. 3), показали поверхностные образцы.

Упругая (скоростная) анизотропия, в отличие от величин скорости распространения упругих колебаний, существенно снижается при росте давления. Вместе с этим, при РТ-условиях массива анизотропия пород может достигать 18% по скорости продольных и 38% – по скорости сдвиговых волн [6].

В целом, сравнивая глубинные и приповерхностные породы можно сделать вывод, что на скоростные (сейсмические) свойства первых микротрещиноватость и трещиноватость оказывает влияние до глубин ~3-5 км (в пределах до нагрузок 100-150 МПа). На больших глубинах их свойства определяются (за исключением зон разуплотнения) кристаллической основой породы. В метаморфических породах на распространение сейсмических волн существенное влияние будет оказывать упругая (скоростная) анизотропия.

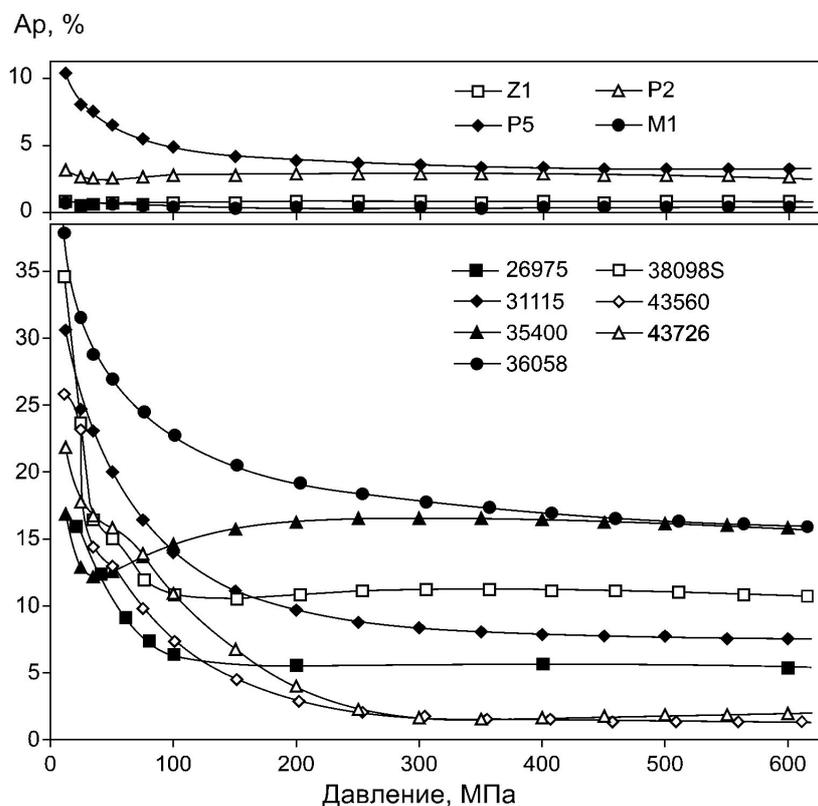


Рис. 3. Зависимости показателя анизотропии A_p , рассчитанного по скорости распространения продольных волн, от приложенного давления.

Образцы №№ Z1, P2, P5, M1 отобраны на земной поверхности.

Образцы 26975, 31115, 35400, 36058, 38098S, 43560, 43726 изготовлены из керна Кольской СГ-3

Поскольку приведенные результаты опираются на прямые экспериментальные исследования глубинного вещества, по нашему мнению, их следует учитывать при построении геофизических скоростных разрезов земной коры в кристаллических массивах.

Работа поддержана грантом № 07-05-00100 Российского Фонда фундаментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горяинов П.М., Давиденко И.В., Горбачевич 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: Изд-во КНЦ АН СССР. 1992. С. 136-144.
2. Горбачевич Ф.Ф. Акустополаризация горных пород. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 1995. 204 с.
3. Kern H., Popp T., Gorbachevich F., Zharikov A., Lobanov K.V. and Smirnov Yu.P. Pressure and temperature dependence of V_p and V_s in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy // Tectonophysics. 2001. V. 338. P. 113-134.
4. Головатая О.С., Горбачевич Ф.Ф., Керн Х., Попп Т. Свойства некоторых пород из разреза Кольской сверхглубокой скважины при изменении РТ-параметров // Физика Земли. № 11. 2006. С. 1-14.
5. Горбачевич Ф.Ф., Головатая О.С., Ильченко В.Л., Керн Х., Попп Т., Смитсон С., Ай Е., Христенсен Н. Упругие свойства некоторых образцов пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), определенные при атмосферных условиях и условиях «in situ» // Физика Земли. № 7. 2002. С. 46-55.
6. Строение литосферы российской части Баренц-региона / Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2005. 318 с.