

Сейсмические свойства пород из Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов на поверхности в условиях адекватных глубинным

Х. Керн¹, Т. Попп¹, Ф.Ф. Горбацевич², А.В. Жариков³, К.В. Лобанов³, Ю.П. Смирнов⁴

¹ Геолого-минералогический институт, Кильский университет, Германия

² Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

³ Институт геологии рудных месторождений РАН, Москва

⁴ НПЦ "Кольская сверхглубокая", Заполярный

Аннотация. Исследовано влияние давления и температуры на сейсмические свойства образцов протерозойских и архейских пород, извлеченных из Кольской сверхглубокой скважины, и их гомологов на поверхности. Показано, что при повышении всестороннего давления приблизительно до 200 МПа скорости Р- и S-волн увеличиваются нелинейно, при более высоком давлении наблюдается линейное изменение этих характеристик. Увеличение температуры при высоком всестороннем давлении (600 МПа) приводит к небольшому линейному снижению скорости Р- и S-волн. Самая высокая степень сейсмической анизотропии зарегистрирована в образцах при низких давлениях. По степени влияния трещин на сейсмическую анизотропию можно отличать глубинные образцы от поверхностных.

Abstract. Elastic wave velocities in rock deep samples with increasing loads from barometric pressure to 600 MPa and temperature to 600° C have been determined. Experimentally determined velocities *in situ* correlate well with the data of vertical seismic profiling performed in the Kola Superdeep Borehole. The correlation between these data will be more complete if the velocity anisotropy of rocks *in situ* is taken in consideration.

1. Введение

Кольская сверхглубокая скважина (СГ-3) около г. Заполярного (Россия) является самой глубокой скважиной, пробуренной в кристаллических породах. Она пересекает около 7 км протерозойских пород Печенгской структуры и 5 км архейского основания Балтийского щита. Научно-производственный центр "Кольская сверхглубокая", Институт геологии рудных месторождений РАН и Геологический институт КНЦ РАН провели ряд фундаментальных исследований (петрологических, минералогических, геохимических, петрофизических и др.) уникальной коллекции керна, собранной до глубины 12261 м (*Кольская сверхглубокая*, 1984; *Казанский и др.*, 1985; 1994). Эти исследования были продолжены на международном уровне в рамках Международной программы по геологической корреляции МПГК-408.

Согласно этой программе, исследовалось влияние давления и температуры на сейсмические свойства образцов протерозойских и архейских пород, извлеченных из Кольской сверхглубокой скважины, и их гомологов на поверхности. Особое значение придавалось исследованиям сейсмических свойств кристаллических пород *in situ* и, в частности, природе наблюдаемой сейсмической анизотропии. Основные результаты, полученные к настоящему времени, опубликованы в работе (*Kern et al.*, 2001). Ниже приводится краткое изложение наиболее важных результатов.

2. Образцы пород и методы исследования

Были отобраны 8 образцов различных пород из разреза СГ-3. Шесть образцов с глубины 8718-11718 м представляют типичные породы архейского основания (гнейсы, амфиболиты). Два образца (милонит, катаклазит) извлечены с глубины 4673-5056 м из протерозойских пород. Четыре образца с поверхности (метадиабаз, метааркоз, плагиопорфирит) представляют протерозойский комплекс, четыре других – архейское основание (амфиболит, гнейс). Все породы метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фации, состав их изменяется от кислого через средний до основного. Поскольку Печенгская структура является синформной, образцы с поверхности, имеющие одинаковый минеральный состав и степень метаморфизма с породами из разреза скважины, были отнесены к гомологам глубинных.

Измерения скорости распространения продольных и поперечных волн, плотности пород проводили на кубических образцах (длина ребра 43 мм), обезвоженных в сушильном шкафу, в аппарате высокого давления методом импульсного ультразвукового зондирования (*Kern*, 1982; *Kern et al.*, 1997). Излучатели, выполненные из свинцово-циркониевого титаната, работали на частоте 2 МГц. Слоистость и линейность структуры породы была выбрана в качестве основы для системы координат образца: по

нормали к слоистости направлялась ось (Z), перпендикулярно линейности и параллельно слоистости – ось (Y) и параллельно линейности – ось (X). Измерительная установка позволяет проводить одновременные измерения скорости распространения продольных и ортогонально поляризованных поперечных волн (S_1 , S_2). В процессе измерений векторы поляризации датчиков поперечных волн были ориентированы таким образом, что направления смещения частиц среды S_1 и S_2 были параллельны и перпендикулярны слоистости и линейности образца соответственно. Изменение длины и объема кубических образцов в зависимости от изменения главного напряжения и температуры измеряли путем регистрации смещения плит пресса. Суммарная ошибка определений V_P и V_S , по нашей оценке, составляет менее 1 %. Плотность пород рассчитывали по массе и размерам образца.

3. Результаты исследований

Измерения проводили при повышении нагрузки от атмосферного давления до 600 МПа при комнатной температуре. Затем на следующем этапе температуру повышали до 600°C при всестороннем давлении 600 МПа. Для каждого из образцов было получено три значения скорости Р-волн, шесть – скорости S-волн и величины объемной деформации в зависимости от давления и температуры.

4. Зависимость V_P и V_S от давления и температуры

При повышении всестороннего давления приблизительно до 200 МПа скорости Р- и S-волн увеличиваются нелинейно, при более высоком давлении наблюдается линейное изменение этих характеристик. Существенная корреляция между зависимостями скорости и объемной деформации образцов от давления может быть объяснена тем, что нелинейное увеличение скорости для образцов из разреза СГ-3 обусловлено закрытием микротрещин при давлении в интервале 150-250 МПа (Kern et al., 1991; Vernik, Nur, 1992). В диапазоне низких давлений кривые зависимости скорости от давления для образцов из разреза СГ-3 существенно отличаются от аналогичных кривых, полученных для пород с поверхности. Значительное увеличение скорости Р- и S-волн, зафиксированное на образцах из разреза СГ-3, свидетельствует о том, что порода подверглась существенному разуплотнению в процессе бурения и резкого сброса давления и температуры при ее извлечении на поверхность. При всестороннем давлении выше 200 МПа образцы деформируются практически до состояния, адекватного РТ-условиям *in situ*, и зависимости, полученные для образцов из разреза СГ-3 и с поверхности, становятся практически одинаковыми. Однако следует отметить, что некоторое количество трещин при давлении ниже 1000 МПа закрываются не полностью (Christensen, 1974). Это относится к трещинам, у которых сравнительно малое отношение ширины их раскрытия к длине.

Скорости Р- и S-волн резко увеличиваются при снижении плотности породы. С уменьшением содержания SiO_2 в породе величины скорости распространения волн возрастают. Средние скорости Р- и S-волн (при давлении 600 МПа) находятся в диапазоне 5.92-6.93 и 3.44-4.09 км/с соответственно. Величина отношения V_P/V_S изменяется в пределах 1.69 и 1.72, что соответствует данным, полученным Digranes et al. (1996) методом вертикального сейсмопрофилирования.

Увеличение температуры при высоком всестороннем давлении (600 МПа) приводит к небольшому линейному снижению скорости Р- и S-волн, поскольку такое давление препятствует возникновению термальной трещиноватости (Kern, 1982). Изменения скорости Р- и S-волн в пределах линейного участка зависимости от давления и температуры отражают присущие породе свойства, которые определяются объемным содержанием основных минералов, упругими свойствами единичного кристалла и предпочтительной ориентировкой структурной решетки (ПОР). Тенденции изменения в пределах линейного участка (для давлений 300-600 МПа и температур 20-500°C) позволили получить зависимости величин скорости (в том числе, относительных скоростей V_0) от давления и температуры. Эти зависимости позволяют осуществить экстраполяцию величин сейсмических скоростей для любых РТ-условий, в которых находится порода, в пределах зоны стабильности составляющих породу минералов. Полученные зависимости, таким образом, являются важным инструментом для калибровки сейсмических данных применительно к определенным глубинам нахождения пород.

5. Анизотропия

Одновременные измерения величин V_P и V_S по основным структурным направлениям породы, т.е. параллельно и по нормали к слоистости и линейности, позволяют рассчитать коэффициент сейсмической анизотропии, который определяется как $A = [(V_{max} - V_{min})/V_{mean}] \times 100, (\%)$ (Birch, 1961). Анизотропию скорости S-волн рассчитывают по максимальным и минимальным скоростям двух ортогонально поляризованных S-волн, измеренных в X, Y, и Z направлениях. Р- и S-волны обычно распространяются с большей скоростью в плоскости слоистости (параллельной X и Y) и медленнее – по нормали к ней (параллельно Z).

Самая высокая степень сейсмической анизотропии зарегистрирована в образцах при низких давлениях, что может быть вызвано влиянием ориентированных микротрещин и предпочтительной ориентировкой структурной решетки (ПОР) в породах. При увеличении давления влияние трещин снижается, и остаточная анизотропия обусловлена ПОР основных минералов (Kern, Wenk, 1990; Ji, Salisbury, 1993). По степени влияния трещин на сейсмическую анизотропию можно отличать глубинные образцы от поверхностных. Необычайно высокая степень анизотропии V_p , измеренная на образцах пород из разреза СГ-3 при низком давлении, и резкое снижение скоростной анизотропии при увеличивающемся давлении указывает на значительное разуплотнение глубинных пород. Самая высокая степень анизотропии V_p , зарегистрированной при высоких давлениях (связанной с ПОР), отмечена в биотитовых гнейсах и амфиболитах. Высокая анизотропия для V_p при высоком давлении (приблизительно 22 %) в биотитовом амфиболите (обр. 35400) и биотит-роговообманковом гнейсе (обр. 36058) обусловлена упорядоченным расположением в породе минералов слюды и роговой обманки, проявляющих заметную анизотропию единичного кристалла – 60 % и 27 % соответственно.

Наличие сейсмической анизотропии подтверждается также показателем расщепления поперечной волны, или показателем акустического двулучепреломления. В слоистых гнейсах и амфиболитах расщепление поперечной волны происходит параллельно плоскости слоистости (плоскость XY). При этом более быстрая компонента поперечной волны, возникающая при расщеплении, поляризована параллельно плоскости слоистости и линейности. Перпендикулярно плоскости слоистости (параллельно оси Z) двулучепреломление S-волны практически не наблюдается, т.е. образцы можно охарактеризовать как квазиизотропные для распространения поперечной волны в этом направлении. Расщепление поперечной волны обычно бывает наибольшим при низком давлении на образец, оно уменьшается по мере увеличения давления. Это еще раз подтверждает взаимовлияние скоростной анизотропии при низких давлениях, обусловленной наличием микротрещин в образцах и вызванной ПОР.

6. Моделирование объемных сейсмических скоростей

Тесная связь между сейсмической анизотропией, расщеплением поперечной волны и ее поляризацией по отношению к структурным элементам породы (слоистости, линейности), установленная в процессе экспериментов, подтверждается расчетом величин скорости, обусловленных ПОР основных минералов и свойствами единичных минеральных зерен. Детальное исследование структуры образца 36058 – биотит-роговообманкового гнейса показало, что измеренная кристаллографическая структура (ПОР) минералов биотита и роговой обманки существенно влияет на скоростную анизотропию. Это подтверждается стереограммами результатов расчета скоростей P- и S-волн биотита и роговой обманки. Структура и соответствующие свойства единичных кристаллов обоих минералов взаимосвязаны. Установлено, что направления, в которых скорости P-волн максимальны, параллельны линейности и слоистости образцов и связаны с максимумом концентрации роговообманковых (001) и биотитовых (100) + (010)-осей соответственно. В роговообманковых и биотитовых кристаллах в направлении этих осей наблюдаются максимальные скорости распространения волн. Направление, вдоль которого регистрируются минимальные значения скорости P-волн, перпендикулярно слоистости образцов. Оно соответствует максимальной концентрации биотитовых (001) и роговообманковых (100)-осей. Эти направления отвечают самым медленным величинам скорости поперечных волн в обоих минералах. Результаты расчетов также указывают на тесную связь величины скорости поперечных волн с ориентировкой структуры породы, что подтверждается взаимным влиянием расчетных $V_{S1}-V_{S2}$ трехмерных скоростных поверхностей биотита и роговой обманки. В образцах зарегистрировано значительное двулучепреломление поперечной волны при распространении волны параллельно плоскости слоистости. При этом наибольшей скоростью обладает волна с ориентацией вектора поляризации параллельно плоскости слоистости. Двулучепреломление поперечной волны практически отсутствует при распространении волны перпендикулярно плоскости слоистости.

Сейсмические скорости в породах, измеренные при 600 МПа, и расчетные результаты, полученные по данным ПОР, вполне сопоставимы. При распространении волн параллельно плоскости слоистости породы скорость P-волн принимает максимальное значение. Эта скорость минимальна при распространении волны перпендикулярно плоскости слоистости. Расщепление поперечной волны также максимально при распространении волны параллельно плоскости слоистости. При этом наибольшей скоростью обладает волна с ориентацией вектора поляризации параллельно плоскости слоистости. Однако влияние давления на скоростную анизотропию и расщепление поперечных волн, подтвержденное экспериментами, указывает на то, что ориентированные микротрещины (микротрещины по границам зерен, трещины скола) в значительной степени определяют величины скорости P- и S-волн при низком давлении. В протестированных образцах межкристаллические (трещины по границам зерен) и внутрикристаллические микротрещины (трещины скола), в частности, коррелируют с упорядоченным расположением чешуек слюды и призм роговой обманки, которые и определяют плоскость слоистости.

7. Сравнение модельных данных с данными *in situ*

Сравнение экспериментально полученных величин скорости при условиях *in situ* с данными, полученными в лабораторных условиях и опубликованными геофизическими данными ВСП, показало, что наблюдаемое снижение этих величин с увеличением глубины извлечения образца (при измерениях, выполненных на образцах при атмосферном давлении) связано с ростом количества микротрещин, вызванным сбросом давления и термальным растрескиванием (трещинообразованием) в процессе бурения и извлечения породы на поверхность. Заметное влияние давления на скорости Р- и S-волн в образцах доказывает, что эти скорости, измеренные в лабораторных условиях, не пригодны для какой-либо интерпретации геофизических данных. Достоверные данные могут быть получены лишь при больших давлениях, позволяющих восстановить первоначальную микроструктуру породы *in situ*.

Полученные экспериментальным путем скорости *in situ*, являющиеся средними из трех структурных направлений (три величины скорости Р-волн и шесть скоростей S-волн, соответственно), вполне соотносятся с данными ВСП. Соответствие между этими данными станет еще полнее, если будет учтена скоростная анизотропия пород *in situ* (связанная с азимутом и углом наклона слоистости пород). Полученная корреляция между экспериментальными данными и расчетом степени двулучепреломления поперечной волны, с учетом структурной системы координат (слоистостью и линейностью) для протерозойских и архейских пород позволяет интерпретировать возникновение поляризации поперечной волны, зарегистрированную при ВСП (Digranes et al., 1996), как результат упорядоченного расположения кристаллов слюды и роговой обманки, определяющих слоистость породы.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д. Шульцэ-Кортнак за помощь в проведении экспериментов, Г. Флиндт и Т. Кох за помощь в оценке экспериментальных данных и результатов измерений ПОР соответственно. Авторы признательны С. Смитсону за предоставленную ссылку на работу Digranes et al. (1996). Особую признательность мы выражаем Немецкому фонду научных исследований и МПГК-ЮНЕСКО (Проект № 408) за финансовую поддержку.

Литература

- Birch F. The velocity of compressional waves in rocks to 10 kbar. Part 2. *J. Geophys. Res.*, v.66, p.2199-2224, 1961.
- Christensen N.I. Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars. *J. Geophys. Res.*, v.79, p.407-412, 1974.
- Digranes P., Kristoffersen Y., Karajev N. An analysis of shear waves observed in VSP data from the superdeep well at Kola. Russia. *Geophys. J. Int.*, v.126, p.545-554, 1996.
- Ji S., Salisbury M.H. Shear wave velocities, anisotropy and splitting in high-grade mylonites. *Tectonophysics*, v.221, p.453-473, 1993.
- Kern H. P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock microstructure. Ed. W. Schreyer. *Schweizerhartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart*, p.15-45, 1982.
- Kern H., Wenk H.R. Fabric-related velocity anisotropy and shear wave splitting in rocks from Santa Rosa mylonite zone. *California J. Geophys. Res.*, v.95, p.11213-11223, 1990.
- 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.*, v.102, p.3051-3065, 1997.
- 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 analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy. *Tectonophysics*, v.338, p.113-134, 2001.
- Kern H., Schmidt R., Popp T. The velocity and density structure of the 4000 m crustal segment at the KTB drilling site and their relationship to the lithological and micro-structural characteristics of the rocks: An experimental approach. *Scientific Drilling*, v.2, p.130-145, 1991.
- Vernik L., Nur A. Petrophysical analysis of the Canon Pass scientific well: Implications for fluid flow and seismic studies in the continental crust. *J. Geophys. Res.*, v.97, p.5121-5234, 1992.
- Казанский В.И., Боронихин В.А., Ванюшин В.А., Глаголев А.А., Кузнецов Ю.И., Ланев В.С., Лобанов К.В., Прохоров К.В., Смирнов Ю.П., Старостин В.И. Соотношения между деформациями, метаморфизмом и петрофизическими свойствами пород в Печенгском рудном районе. Внутреннее строение рудоносных докембрийских разломов. *М., Наука*, с.6-47, 1985.
- Казанский В.И., Кузнецов О.И., Кузнецов А.В., Лобанов К.В., Черемисина Е.Н. Глубинное строение и геодинамика Печенгского рудного района: Опыт изучения Кольской сверхглубокой скважины. *Геология рудных месторождений*, т.36, № 6, с.500-519, 1994.
- Кольская сверхглубокая. Исследование глубинного строения континентальной коры с помощью бурения Кольской сверхглубокой скважины. Под ред. Е.А. Козловского. *М., Недра*, 490 с., 1984.