

Тремолиты из Кольской сверхглубокой скважины (12148 м) и их поверхностные аналоги: электросопротивление, теплоемкость и спектроскопические определения при высокой температуре

Г. Партхасарати

Национальный исследовательский геофизический институт, Хайдарабад, Индия

Аннотация. В работе впервые приводятся данные о зависимости электросопротивления и теплоемкости природного тремолита от температуры в диапазоне до 1300 К. При исследовании использовались образцы из Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), отобранные с глубины 12148 м и с поверхности из массива Idegondanahalli, Karnataka, Индия. Породы обоих образцов формировались в идентичных условиях метаморфизма. Установлено, что электросопротивление тремолита из скважины составляет $1.02 \cdot 10^{11}$ Ом·см при 415 К и уменьшается по экспоненте при увеличении температуры до 903 К, затем электросопротивление увеличивается от $1.412 \cdot 10^6$ Ом·см до $3.158 \cdot 10^7$ Ом·см. Этот переход интерпретируется как разложение тремолита под действием температуры, поскольку переход в температурном диапазоне 903-963 К является необратимым процессом. Следующий фазовый переход, обнаруженный при помощи дифференциального термического анализа (ДТА), наблюдается при 1050 К. Зависимость теплоемкости тремолита от температуры до 1300 К также подтверждает наличие фазового перехода. Фазовые переходы, наблюдаемые в образце из скважины СГ-3, сравнивали с термическим поведением образца тремолита, отобранного из массива Idegondanahalli.

Abstract. We have reported here temperature dependence of electrical resistivity, heat capacity of natural tremolite up to 1300 K for the first time. The samples used in the present study, are natural tremolites from the core samples of the Kola Superdeep well (SG-3) from the depth of 12148 meters and a surface sample from Idegondanahalli, Karnataka, India. Both samples have witnessed identical peak metamorphic conditions. The electrical resistivity of the tremolite from the SG-3 is found to be $1.02 \cdot 10^{11}$ Ohm.cm at 415 K, and decreases exponentially with the increase of temperature up to 903 K, where the electrical resistivity increases from $1.412 \cdot 10^6$ Ohm.cm to $3.158 \cdot 10^7$ Ohm.cm. The transition is interpreted as thermally induced decomposition of tremolite, as the transition in the temperature range 903 K to 963 K is found to be irreversible in their electrical resistivity behaviour. This phase transition is also observed at 1050 K in differential thermal analysis (DTA). Temperature dependence of heat capacity of tremolite up to 1300 K also confirmed the phase transition. The phase transition observed in the SG-3 sample has been compared with the thermal behaviour of a surface sample of tremolite from Idegondanahalli.

1. Введение

Кольская сверхглубокая скважина, расположенная вблизи г. Заполярный, является самой глубокой скважиной в мире (12261 м). Ее изучение предоставляет широкие возможности для понимания процессов, происходящих в земной коре, в том числе и для определения химического состава докембрийской континентальной коры. Международная программа по геологической корреляции инициировала международный проект МПГК-408 "Сравнение состава, структуры и физических свойств пород и минералов Кольской сверхглубокой скважины и их гомологов на поверхности". Эта программа явилась долгосрочной международной научной попыткой исследовать и понять природу и эволюцию континентальной коры. Знание электрических свойств минералов и расплавов может способствовать более полной интерпретации геофизических исследований внутренней электрической структуры Земли. Кроме того, данные о электрическом сопротивлении используются при изучении устойчивости минералов, электронных и ионных процессов переноса, химии дефектов и других физических свойств минералов. Известно, что электросопротивление очень чувствительно к содержанию флюидов, незначительных химических примесей и микроскопических дефектов, таких, как микротрещинные пустоты, включения, двойники минералов и др.

Электрическое сопротивление и сейсмические скорости существенно изменяются при реакциях обезвоживания в минералах, содержащих воду (Popp, Kern, 1993). Изучение электрического сопротивления образцов пород из Кольской сверхглубокой скважины показало низкую энергию активации

электропроводности пород (Bondarenko et al., 1984), что указывает на присутствие актинолита, как основного компонента в породах. Наши недавние экспериментальные исследования зависимости измеренного при постоянном токе электрического сопротивления от температуры, проведенные на природных амфиболах, показали, что получаемые данные очень важны при изучении термодинамики фазовой устойчивости этих минералов (Sarma, Parthasarathy, 1999; Parthasarathy, Gowd, 2002). В данной работе представлены первые экспериментальные результаты изучения зависимости электрического сопротивления (измеренного на постоянном токе) и теплоемкости от температуры для природных тремолитов из СГ-3 и таких же тремолитов, отобранных с земной поверхности.

2. Геологическая обстановка и образцы

Кольская сверхглубокая скважина СГ-3 расположена в северо-восточной части Балтийского щита, в пределах Печенгской структуры и примерно в 150 км к северо-западу от г. Мурманск. Геологический разрез скважины подробно изложен в книге (Kozlovsky, 1984). Переход от зеленосланцевой к эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма наблюдается на глубине 4300-4500 м. Ниже этого уровня из-за предпочтительной ориентировки минералов, таких, как слюда и амфибол, порода равномерно рассланцована. Подробное петрографическое описание и описание физических свойств пород – плотности, сейсмической скорости и пористости пород – даны в работах (Vernik et al., 1994; Kern et al., 2001).

Для исследований нам были предоставлены образцы керна СГ-3, отобранные с глубин 560, 4673, 9190 и 12148 м. Для данного исследования был выбран образец полевошпатового амфиболита с глубины 12148 м. По оценке, проведенной с помощью гранато-биотитового геотермометра, максимальная температура метаморфизма породы этого образца составляет 973-1023 К (что соответствует 700-750° С). Образец тремолита с поверхности отобран из массива Idegondanahalli, Holenarasipur, Karnataka, Индия (координаты 12°39'N : 76°19'E). Вариации состава, наблюдаемые в амфиболах (Anantha, Kutty, 1976), согласуются с амфиболито-гранулитовой фацией, иначе называемой Sargur фацией. По оценке, максимальная температура метаморфизма вмещающих пород составляет около 973-1023 К, а давление – 0.76-0.8 ГПа (Raith et al., 1983; Radhakrishna, Vaidyanadhan, 1997).

3. Экспериментальные методы

Зеленый тремолит был выделен вручную с помощью бинокулярного микроскопа. Электронные микроанализы тремолита проводились на CAMECA Camebax SX50, с ускоряющим напряжением 15 кВ, током пучка 3.3 нА и диаметром пучка 1-2 микрона. Качественный состав тремолита определялся при помощи сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-520 методом EDAX, с током накала 110 микроампер и ускоряющим напряжением 20 кВ. Порошковая рентгеновская дифрактометрия проводилась с помощью порошкового дифрактометра Siemens D-5000 с графитовым монохроматором NOPG. Во всех дифракционных экспериментах использовалось излучение Cu-K α с длиной волны 0.15406 нм. Дифференциальный термический и термогравиметрический анализы проводились при температуре до 1300 К с помощью системы Mettler-Toledo Star на образце 20 мг при скорости нагревания 20 К/мин. Инфракрасные спектры с Фурье-преобразованием (FT-IR) были записаны методом трансмиссии с помощью калийных бромидных прессованных дисков и спектрофотометров BIORAD FT-IR. Прибор Nicolet очищали сухим воздухом, не содержащим CO₂. Чистый калийно-бромидный диск использовали для создания фона, который автоматически вычитался при определении FT-IR данных по образцам.

Разрешение спектров обычно составляло 2 см⁻¹. Все спектры были записаны в частотном диапазоне 4000-1500 см⁻¹. Измерение теплоемкости проводилось при температуре до 1300 К с помощью прибора Perkin-Elmer model DSC, соединенного с компьютером, дифференциального сканирующего калориметра со скоростью нагревания 10 К/мин и установленным пределом измерений порядка 1.5 Дж/мин. Все образцы были заключены в алюминиевые капсулы и взвешены на микровесах. Ячейка DSC нагревалась платиновым нагревателем сопротивления, а температура измерялась при помощи платиновых температурных датчиков. Точность измерения температуры составляла ± 0.1 К, калориметрическая точность была выше ± 0.1 % (Parthasarathy et al., 2002). Точность данных DSC определяли путем сравнения теплоемкости корунда и шпинеля (Robie et al., 1978; Navrotsky, 1995). Электрическое сопротивление измеряли стандартным четырехэлектродным методом (Sarma, Parthasarathy, 1999).

4. Результаты и дискуссия

Петрографическое исследование шлифа образца из СГ-3 (12148 м) показало, что в нем содержатся зеленый амфибол, пироксен, коричневатого-желтый биотит, слюда, циркон и плагиоклаз. Составы образца тремолита из СГ-3 и образца с поверхности из Карнатака (КАР) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав тремолитов

Оксиды	СГ-3	Катионы	КАР	Катионы
SiO ₂	58.08	8.01	56.49	7.87
TiO ₂	0.00	0.00	0.08	0.01
Al ₂ O ₃	0.51	0.08	1.28	0.21
Fe ₂ O ₃	0.15	0.02	0.97	0.10
FeO	2.74	0.32	7.39	0.86
MgO	21.42	4.40	20.46	4.25
MnO	0.22	0.03	0.11	0.01
CaO	13.01	1.92	10.31	1.54
Na ₂ O	0.36	0.10	0.45	0.12
K ₂ O	0.18	0.03	0.16	0.03
H ₂ O	2.41	2.22	2.26	2.10
Всего	99.08	17.12	99.96	17.09

Примечание: содержание воды измеряли термогравиметрическим методом; содержание оксидов выражено в мас.%. Значения состава являются средними величинами, полученными в результате шести различных анализов трех различных зерен тремолита. Расчет катионов произведен на основе 24 (O,OH).

5. Порошковая рентгеновская дифрактометрия

Данные анализов, приведенные в табл. 1, ясно указывают, что оба образца являются тремолитами согласно номенклатуре группы амфиболов, утвержденной Комиссией Международной минералогической ассоциации по минералам и их названиям (*Leake et al.*, 1997). Порошковая рентгеновская дифрактометрия образца тремолита из СГ-3 показала сильные отражения при частотах 0.8996, 0.8379, 0.4858, 0.4489, 0.3369, 0.3272, 0.3119, 0.2933, 0.2728, 0.2700, 0.2588, 0.2530 нм, соответствующие тремолитовой фазе. Расчет параметров единичной ячейки показал, что $a = 0.9827$ нм, $b = 1.8034$, $c = 0.5269$ и $\beta = 104.75^\circ$. Оказалось, что эти данные прекрасно согласуются с данными JCPDS Card No. 44-1402.

Параметры единичной ячейки образца с поверхности составляют $a = 0.990$ нм, $b = 1.048$, $c = 0.5273$ нм и $\beta = 104.58^\circ$. Они отличаются от величины таких же параметров для образца из СГ-3. Известно, что у тремолита известково-силикатного парагенезиса $\beta = 104.75-104.78^\circ$. Этот угол уменьшается с увеличением содержания куммингтонита. Например, у тремолита с 10 % куммингтонита $\beta = 104.5^\circ$ (*Yang, Evans*, 1996). Было также найдено, что параметры единичной ячейки увеличиваются при макроскопическом отношении $(Fe + Mn)/(Fe + Mn + Mg)$. При высоком давлении параметры ячейки тремолита уменьшаются в два раза по сравнению с начальными b и c . Угол β увеличивается не более, чем на 0.1° от Mg до крайнего члена Fe. Угол β хорошо согласуется с содержанием Ca в позиции M4 и увеличивается с 104.5° (10 % куммингтонита) до 104.78° (1 % куммингтонита) (*Evans, Yang*, 1998). Причинами наблюдаемых различий в параметрах единичной ячейки образцов тремолита из скважины и с поверхности могут быть небольшие изменения состава тремолита или сброс давления в образце СГ-3 при извлечении с большой глубины.

6. Электрическое сопротивление

Изменение электропроводности земной коры, как правило, соотносится с сейсмическим волноводом (зоной пониженных скоростей). Одновременное снижение электросопротивления и сейсмической скорости свидетельствует об увеличении пористости и проницаемости в присутствии минерализованной воды (*Vanyan et al.*, 2001). Для того, чтобы лучше понять влияние температуры на проводимость коры, мы провели эксперименты по изучению изменения электросопротивления амфиболов из образцов Кольской скважины при высокой температуре, вплоть до 1300 К. Ранее мы опубликовали работу об изменении электросопротивления куммингтонита (*Parthasarathy, Gowd*, 2002). В данной работе мы представляем результаты, полученные по тремолиту. Зависимость электрического сопротивления при постоянном токе в образцах тремолита от температуры показана на рис. 1.

Электрическое сопротивление измеряли стандартным четырехэлектродным методом. При комнатной температуре (300 К) электрическое сопротивление образцов из скважины и с поверхности было выше входного полного сопротивления электрометра и поэтому могло быть измерено. Электрическое сопротивление образца с поверхности измерялось при температуре 503-1200 К. Тремолит из скважины обладает лучшей проводимостью по сравнению с образцом с поверхности, поэтому его исследовали при температуре 415-1200 К. Более низкие значения сопротивляемости образцов из скважины можно объяснить наличием микротрещин, вызванных разуплотнением, появившимся в результате бурения, извлечения керна и резкого сброса давления и температуры (*Kern et al.*, 2001).

Архейские породы из Кольской скважины имеют самое высокое электросопротивление ($9.6-7.6 \cdot 10^8$ ом-см) по сравнению с метадиабазами ($4.5-5.6 \cdot 10^3$ ом-см). Электросопротивление тремолита

(СГ-3) составляет $1.02 \cdot 10^{11}$ ом·см при температуре 415 К и уменьшается по экспоненте с увеличением температуры до 903 К. Затем сопротивление увеличивается от $1.412 \cdot 10^6$ до $3.158 \cdot 10^7$ ом·см (рис. 1). Поверхностные образцы тремолита показывают не только более высокие значения сопротивления при 503 К, но и более высокие температуры перехода – 978-1018° К. В цикле охлаждения сопротивление образцов демонстрирует отчетливый необратимый тренд с изменением направления кривых при 500-480 К.

Электросопротивление образца, охлажденного от высокой температуры до комнатной, составляет $1.69 \cdot 10^8$ ом·см. Линейная зависимость сопротивления от температуры указывает на то, что образцы проявляют термически активированную проводимость. Наблюдаемое поведение электропроводности в тремолитах используется по Аррениусу для определения энергии активации проводимости при атмосферном давлении. Значение энергии активации проводимости для тремолита из скважины составляет 0.74 эВ в температурном диапазоне 415-900° К, для поверхностных образцов – 1.274 эВ. В цикле охлаждения поверхностные образцы тремолита показывают очень низкие значения энергии активации – 0,25 эВ (рис. 1). Изменение кривой в температурном диапазоне 480-500° К можно объяснить изменением механизма проводимости вследствие окислительно-восстановительной реакции с Fe^{3+} до Fe^{2+} . Известно, что железосодержащие минералы проявляют такую незначительную полярон-скачкообразную проводимость там, где ионы Fe^{3+} могут замещаться ионами Fe^{2+} (Sarma, Parthasarathy, 1999). Проведенные ранее исследования электросопротивления образцов из Кольской скважины показали, что энергия активации этих образцов не превышает 2.2 эВ (Bondarenko et al., 1984).

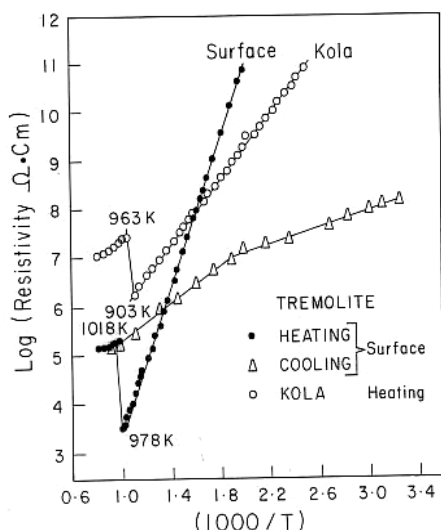


Рис. 1. Зависимость электрического сопротивления при постоянном токе тремолита из Кольской сверхглубокой скважины (светлые кружки) и образца с поверхности из массива Карнакат от температуры (данные по циклу нагревания обозначены темными кружками, данные по циклу охлаждения – светлыми треугольниками). Обращает внимание факт необратимого характера фазового перехода в тремолите

7. Дифференциальный термический анализ

Для того, чтобы понять природу фазовых превращений в тремолите, мы провели высокотемпературный дифференциальный термический анализ (ДТА) тремолита из СГ-3 и поверхностных образцов. Треки образцов показаны на рис. 2. Эндотермический пик при температуре 1050 К для образца из скважины и при 1078 К для поверхностного образца ясно указывают на то, что фазовый переход включает реакции разложения и обезвоживания. Термогравиметрические анализы показали, что потери веса при переходе составляют 2.39 мас.% для образца из СГ-3 и 2.24 мас.% для поверхностного образца. Метод порошковой рентгеновской дифрактометрии для охлажденных образцов подтвердил факт разложения тремолита при высокой температуре.

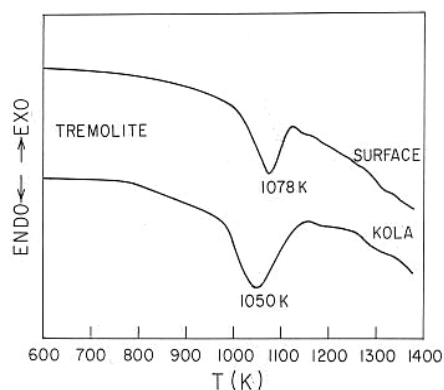


Рис. 2. Дифференциальный термический анализ (ДТА): треки образцов тремолита из СГ-3 и поверхностного при скорости нагревания 10 К/мин

8. Теплоемкость

Зависимость теплоемкости природного тремолита от температуры измерялась ранее несколькими исследователями (Robie et al., 1978). Однако диапазон температур был ограничен 1000 К. Эти термодинамические свойства имеют большое значение для лучшего понимания петрогенезиса широкого круга метаморфических и изверженных пород.

Зависимость теплоемкости тремолита от температуры соответствует уравнению

$$C_p = 3646.9 - 1.6328 \cdot T + 5.393 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 5.046 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0.5} + 5.139 \cdot 10^{-7} \cdot T^2, \text{ Дж/моль} \cdot \text{К},$$

где T – абсолютная температура по Кельвину. Эта формула пригодна для расчетов ниже температуры фазового перехода. Увеличение удельной теплоемкости скачком указывает на фазовый переход первого порядка (рис. 3), который также наблюдается по результатам измерений электросопротивления и ДТА для тех же образцов. Небольшие вариации температуры в наблюдаемой фазе перехода можно объяснить различной скоростью нагревания в разных экспериментах. При температуре ниже 1000 К данные по удельной теплоемкости для поверхностных образцов соответствуют данным, полученным Krupaka et al. (1985). Однако для образца из скважины те же данные во всем диапазоне температур, полученные нами, были ниже. Переходная температура составляет 1023 К, что на 50 К ниже, чем для поверхностных образцов. Интересно отметить, что температура дегидроксилирования природного тремолита составляет 720 К, что почти на 350 К ниже температуры в обезвоженном образце (Deer et al., 1997). Повышенное содержание воды в образце СГ-3 по сравнению с поверхностным образцом (см. табл. 1) приводит, вследствие замедленной реакции дегидратации, к снижению температуры фазового перехода.

9. Инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием (FT-IR)

Поскольку ИК-спектроскопия используется для определения тонкой структуры, связанной с замещением ионов гидроксила катионами, нами был выполнен объемный анализ инфракрасных спектров амфиболов (Hawthorne, 1983; Hawthorne et al., 2000). Основная полоса поглощения валентных колебаний группы ОН в ИК спектрах амфиболов зарегистрирована в диапазоне частот 3750-3600 cm^{-1} . Упорядоченные синтетические и крайние чистые члены группы амфиболов должны иметь лишь одну отчетливую полосу поглощения в этом диапазоне частот. Замещение в катионной и анионной позициях, не связанных напрямую с ОН, может расширить эти полосы или даже ввести новые полосы в диапазон частот (Hawthorne et al., 2000). В структуре амфибола группа ОН напрямую связана с двумя катионами в позиции М1 и одним катионом в позиции М3, а атом Н может выноситься в позицию А, которая может быть занята или свободна. Ближайшая соседняя группировка в окрестности группы ОН может быть представлена для тремолита как MgMgMg-OH-A (Hawthorne et al., 2000). Группа М1М3 окружена двумя октаэдрами М2 и одним октаэдром М3 в пределах октаэдрического слоя и двумя тетраэдрами Т1 в пределах тетраэдрической двойной цепочки. Пик спектров тремолитовых образцов зарегистрирован при 3677 cm^{-1} для образца из скважины и при 3672 cm^{-1} для поверхностного образца. Полная ширина спектра при половине максимума составляет величину менее 5 cm^{-1} для образца из скважины и 10 cm^{-1} для поверхностного образца (рис. 4). Значение частоты согласуется со значением, полученным для крайнего члена – тремолита, т.е. 3675 cm^{-1} с $\text{FWHM} = 3-4 \text{ cm}^{-1}$ (Hawthorne et al., 1997). Небольшое увеличение частоты, наблюдаемой в образце из скважины, может быть вызвано давлением, так как частота валентных колебаний всегда увеличивается с ростом давления.

Снижение частоты спектра в образце с поверхности может быть связано с его составом, что подтверждается наличием нескольких дополнительных пиков при частоте 3654, 3644, 3626 cm^{-1} (рис. 4).

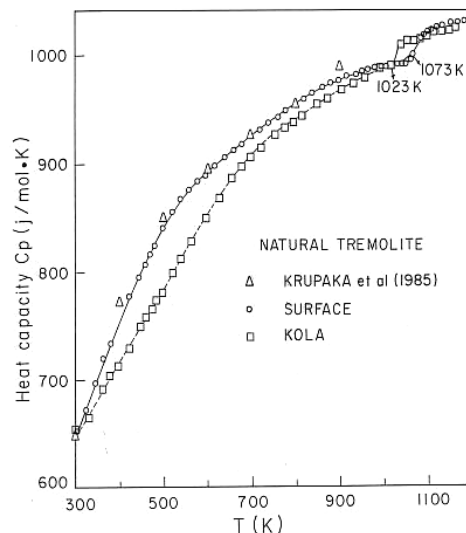


Рис. 3. График зависимости теплоемкости C_p (j/mol·K) природного тремолита от абсолютной температуры.

Светлые треугольники обозначают данные, опубликованные Krupaka et al. (1985). Светлые квадраты представляют данные по образцу из скважины, а светлые кружки – данные по образцам из массива Karnataka. Сплошная и пунктирная линии являются усреднением экспериментальных данных.

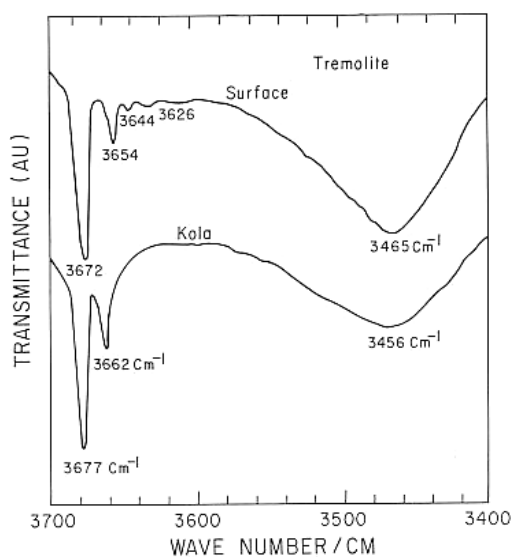


Рис. 4. Инфракрасные спектры с Фурье-преобразованием преимущественно в области колебаний ОН при 300 К для образцов тремолита, отобранного с поверхности и глубинного, из СГ-3

Это явление – появление дополнительных ИК полос поглощения – наблюдалось в синтетических глиноземных тремолитах при частотах 3655, 3642, 3624 и 3608 см⁻¹ (Hawthorne et al., 2000). Дополнительные пики в поверхностных образцах обусловлены наличием Al в позициях T1 и T2. Полоса при частоте 3654 см⁻¹ объясняется группировкой (MgMgMg)-SiAl-MgMgMg; при частоте 3642 см⁻¹ – (MgMgMg)-SiAl-MgMgAl; при частоте 3624 см⁻¹ – группировкой (MgMgAl)-SiSi-MgMgAl в окрестности группы OH в тремолите. Широкий максимум поглощения в диапазоне частот 3450-3465 см⁻¹ вызван наличием молекулярной воды в амфиболах, что наблюдалось в спектрах талька (при 3439 см⁻¹) и асбеста (при 3433 см⁻¹). Интенсивность пика при 3430 см⁻¹ использовалась для диагностики образования тремолита в двух различных обстановках, а именно в присутствии доломита/кварца и асбеста/серпентина (Sarma et al., 2002). В данном исследовании очень трудно использовать эту методологию для понимания парагенезиса тремолита. Снижение интенсивности широкого максимума при 3450-3465 см⁻¹ в образцах из скважины по сравнению с образцами с поверхности могло быть вызвано разуплотнением и различием в составе этих двух образцов. Чтобы понять разницу в поведении этих образцов, необходимо провести дальнейшие исследования их структуры и спектроскопические исследования образцов.

10. Заключение

В работе представлены новые экспериментальные результаты по электросопротивлению при высокой температуре, теплоемкости и инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием образцов тремолита из Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) и с поверхности (массив Капатака, Индия). Данные исследования выявили также тепловой фазовый переход в природном тремолите. Образцы из СГ-3, отобранные с глубины 12148 м, показали более высокие значения электросопротивления, чем образцы из КТБ с глубины 900 м, что указывает на меньшую степень содержания графита в образцах из СГ-3.

Благодарность. Мы чрезвычайно признательны коллективу Научно-производственного центра "Кольская сверхглубокая" и д-ру Феликсу Горбачевичу, ведущему сотруднику Геологического института Российской академии наук, за предоставленные образцы керна из СГ-3. Мы благодарны д-ру Harsh K. Gupta, секретарю правительства Индии, Отдел океанического развития, Нью Дели, за его горячую поддержку и инициирование этой индийско-российской исследовательской программы в рамках проекта МПГК-408. Мы выражаем благодарность д-ру V.P. Dimri, директору NGRI, и д-ру K.V. Raghavan, директору ИСТ, Хайдарабад, за их поддержку и разрешение опубликовать эту работу.

Литература

- Anantha Iyer G.V., Kuttu T.R.N. Geochemistry of amphiboles from the Precambrian of Karnataka. *Journal of the Geological Society of India*, v.17, p.17-36, 1976.
- Bondarenko A.T., Zhamaletdinov A.A., Kuznetsov Y.I., Parkhomenko E.I. Rock Electrical Properties. In: *The Kola Superdeep well of Kola Peninsula*. Ed. Kozlovsky Ye.A. Springer-Verlag, Heidelberg, p.362-367, 1984.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Double-chain silicates. *The Geological Society, London*, 764 p., 1997.
- Evans B.W., Yang H. Fe-Mg order-disorder in tremolite-actinolite-ferro-actinolite at ambient and high-temperature. *American Mineralogist*, v.83, p.458-475, 1998.
- Hawthorne F.C. The crystal chemistry of amphiboles. *Canadian Mineralogist*, v.21, p.173-480, 1983.
- Hawthorne F.C., Della Ventura G., Robert J.L., Welch M.D., Raudsepp M., Jenkins D.M. A Rietveld and infrared study of synthetic amphiboles along the potassium-richterite-tremolite join. *American Mineralogist*, v.82, p.708-716, 1997.
- Hawthorne F.C., Welch M.D., Ventura G.D., Liu S., Robert J.L., Jenkins D.M. Short-range order in synthetic aluminous tremolites: An infrared and triple-quantum MAS NMR study. *American Mineralogist*, v.85, p.1716-1724, 2000.
- Kern H., Popp T., Gorbatshevich F., Zharikov A., Lobanov K.V., 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*, v.338, p.113-134, 2001.
- Kozlovsky Ye.A. The Kola Superdeep well of Kola Peninsula. *Springer-Verlag, Heidelberg*, 558 p., 1984.
- Leake B.E., Woolley A.R., Arps. Nomenclature of Amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, v.35, p.219-246, 1997.
- Navrotsky A. Thermodynamic properties of minerals. In mineral physics and crystallography: A hand book of physical constants. *AGU Reference shelf*, v.2, p.18-28, 1995.

- Parthasarathy G., Gowd T.N.** Structural, electrical and thermal phase stability of cummingtonite from Kola Superdeep borehole (KSDB-3). *Journal of Applied Geochemistry*, v.4, p.103-114, 2002 (in Russian).
- Parthasarathy G., Chetty T.R.K., Haggerty S.E.** Thermal stability and spectroscopic studies of zemkorite: A carbonate from the Venkatampalle kimberlite of southern India. *American Mineralogist*, v.87, p.1384-1389, 2002.
- Popp T., Kern H.** Thermal dehydration reactions characterised by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters*, v.120, p.43-57, 1993.
- Radhakrishna B.P., Vaidyanadhan R.** Geology of Karnataka. Second Edition. *Geological Society of India, Bangalore*, 354 p., 1997.
- Raith M., Rasse P., Akermann D., Lal R.K.** Regional geothermobarometry in granulite facies terrane of South India. *Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, v.73, p.221-244, 1983.
- Robie R.A., Hemingway B.S., Fisher J.R.** Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (10^5 Pa) and at higher temperatures. *United States Geological Survey Bulletin*, No 1452, 456 p., 1978.
- Sarma L.P., Parthasarathy G.** Thermal decomposition of Natural Actinolite: A high-temperature electrical resistivity study. *Journal of Geological Society of India*, v.53, p.571-578, 1999.
- Sarma L.P., Prasad P.S.R., Gowd T.N.** IR band intensity reversal in tremolites. *Journal of Applied Geochemistry*, v.4, p.417-423, 2002.
- Vanyan L., Tezkan B., Palshin N.** Low electrical resistivity and seismic velocity at the base of the upper crust as indicator of rheologically weak layer. *Survey in Geophysics*, v.22, p.131-154, 2001.
- Vernik L., Nur A.** Petrophysical analysis of the Canion Pass scientific well: Implications for fluid flow and seismic studies in the continental crust. *J. Geophys. Res.*, v.97, p.5121-5234, 1992.
- Yang H., Evans B.W.** X-ray structure refinements of tremolite at 140 and 295 K: Crystal chemistry and petrological implications. *American Mineralogist*, v.81, p.1117-1125, 1996.