

ЧТО ТАКОЕ АПАТИТ?

Рена Кнубовец

1. Введение

Апатит – это минерал, то есть химическое соединение, имеющее кристаллическую структуру и образовавшееся в результате геологических процессов. Слово *apatit* греческого происхождения и обозначает «обманываю», так как апатит очень часто путали со многими минералами.

Апатит занимает особое место в огромном минеральном мире, ибо находится на грани живой и неживой природы. К группе апатита принадлежит 95% фосфора земной коры, в то же время апатит является неорганической составляющей костей и зубов позвоночных животных и человека, а также основой многих патологических обызвествлений.

Апатит образуется в различных геологических условиях, встречается во всех типах горных пород: магматического, осадочного и метасоматического происхождения. Апатитовые руды магматического происхождения дают до 20% мировой продукции фосфатов. Осадочные руды, так называемые фосфориты, дают 80%-90% мировой продукции. Крупнейшие месторождения апатитов находятся в России, Канаде, Южной Африке, Бразилии и ряде стран Европы. Основные месторождения фосфоритов сосредоточены в Марокко, Западной Сахаре, Китае, США и России.

Апатиты являются основным сырьём для производства фосфорных удобрений, кормовых фосфатов, технических фосфатов, элементарного фосфора и различных фосфо-органических соединений. Апатиты, активированные редкоземельными элементами, используются как люминесцентный и лазерный материалы. Апатиты – это катализаторы и ионообменники в химической технологии.

Уже несколько десятилетий выяснение кристаллической структуры классическими дифракционными методами (установление типа и координат атомов в объёме элементарной ячейки) превратилось в рутинную задачу. Однако реальная структура, как правило, отличается от дифракционной модели. Определение реальной структуры минералов – это исключительно сложная задача. Необходимые для этого методы физики твёрдого тела являются в основном непрямыми, и для расшифровки получаемых экспериментальных данных нужны специальные теоретические и методические разработки. Оптимальный путь исследования реальной структуры состоит в применении к одному и тому же объекту комплекса разных физических методов. Такой подход очень трудоёмок и не гарантирует успеха. Тем не менее, мы рискнули пойти по этому нестандартному пути, применив к одним и тем же кристаллам методы рентгеновской дифракции, поляризационной инфракрасной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, ядерного магнитного резонанса, термогравиметрического анализа, бумажной хроматографии и некоторые другие.

2. Краткое описание структурной модели апатита

Структура апатита была определена в 1930 г. и с тех пор неоднократно подтверждена многими авторами [1]. Идеализированная формула апатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$. В элементарной ячейке содержится 42 атома, её параметры равны: $a = 9,364 \text{ \AA}$, $c = 6,879 \text{ \AA}$. Структура апатита является гексагональной с симметрией группы $R\bar{6}_3/m$. На рис. 1. приведено схематическое изображение структуры, предложенное академиком Н.В. Беловым. Изображение основано на так называемых Паулинговских полиэдрах, в каждом углу которых расположены атомы кислорода. В этой схеме имеются три типа полиэдров:

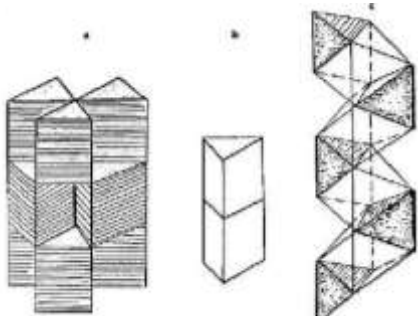


Рис. 1. Полиэдры Паулинга в структуре апатита: (а)-CaII, (в)-CaI, (с)-PO₄.

Ca I, Ca II (в соответствии с двумя катионными позициями в структуре) и (PO₄)³⁻. Изолированные ортофосфатные группы расположены вдоль оси второго порядка между колонками Ca I и Ca II. Атомы фтора находятся в центре Ca II колонок вдоль гексагональной оси.

3. Изоморфные замещения в апатите

Апатиты легко подвергаются различным изоморфным замещениям. Более половины всех химических элементов периодической системы Менделеева обладают способностью входить в структуру апатитов. К этой структурной модели принадлежат, кроме кальциевых фосфатов, многие минералы свинца (фосфаты, арсенаты, ванадаты), редкоземельные силикаты и др.

Изоморфизм анионов вдоль гексагональной оси

Атомы фтора в апатите расположены вдоль гексагональной оси с периодом 3,44Å. Вдоль этой оси имеются каналы, куда могут входить многие ионы: гидроксильные группы, ионы хлора, брома, кислород и сера в различных степенях окисления, различные азотсодержащие ионы: CN₂²⁻, NCN⁻, NCO⁻ и даже целая молекула аминокислоты глицина. Всегда вдоль гексагональной оси присутствует более чем один тип анионов. В минералах обычно много фтора, некоторое количество гидроксильных групп, часто кислород, иногда хлор.

Изоморфные замещения фосфатных групп

Ортофосфатные группы (PO₄)³⁻ в апатите могут быть замещены многими анионами: (SiO₄)⁴⁻, (SO₄)²⁻, (AsO₄)³⁻, (VO₄)³⁻, (AlO₄)⁵⁻, (CrO₄)³⁻ и др. Известны парные замещения P на Si и S в фосфатных минералах, (PO₄)³⁻ на (SiO₄)⁴⁻ и (CO₃)²⁻ или (PO₄)³⁻ на (SiO₄)⁴⁻ и CO₃OH³⁻.

Изоморфные замещения катионов

В апатитах Ca может быть замещён на многие катионы: Pb, Na, K, Sr, Mn, Zn, Cd, Mg, Fe²⁺, Ba, редкоземельные элементы и др. Согласно идеализированной структурной модели, в апатите имеется два типа катионных позиций Ca I и Ca II. Распределение примесных катионов между этими позициями зависит от типа катиона, его количества, а также от анионных замещений в апатите.

4. Особенности реальной структуры апатита

Водородные связи в апатите

Мы впервые обнаружили водородные связи в реальной структуре апатита [2,3], после чего наличие этих связей было подтверждено многими авторами. Методами магнитного резонанса на протонах и ядрах ¹⁹F было показано, что при образовании связей OH...F происходит смещение гидроксильных групп и атомов F вдоль гексагональной оси навстречу друг другу с выходом из плоскости симметрии. В реальной структуре образуются кластеры с расстоянием 2.03Å между атомами F и протонами и 3.70Å между соседними атомами F, в отличие от 3.44Å в регулярной структуре. Кроме OH...F, были обнаружены связи OH...Cl и OH...O. В табл. 1 приведены характеристики этих связей. Водородные связи присутствуют в апатитах высокотемпературного происхождения, а в осадочных образцах появляются после прокаливании. Поляризационные инфракрасные спектры ориентированных срезов монокристаллов апатитов показали присутствие ориентированных молекул воды и наличие гидроксильных групп, не образующих водородных связей. Относительное содержание разного типа гидроксильных групп различно в апатитах из разных типов горных пород.

Таблица 1. Спектральные характеристики водородных связей в апатите

Тип водородной связи	Частота колебаний ОН групп, см ⁻¹	
	Валентных	Либрационных
ОН...Cl	3500	-
ОН...F	3540	670
ОН...O	3570	630

Частичная конденсация ортофосфорных групп до пирофосфатных

Согласно идеализированной структурной модели, в апатите присутствуют только ортофосфатные группы (PO₄)³⁻. Однако мы обнаружили наличие частичной конденсации этих групп до пирофосфатных в реальной структуре природных апатитов [5,6]. Признаком конденсации является появление в ИК спектрах полос поглощения в интервале 700-800 см⁻¹, соответствующих мостиковым связям P-O-P. Из поляризационных ИК спектров ориентированных срезов монокристаллов апатита следует, что полоса 725 см⁻¹ параллельна гексагональной оси, полоса 740 см⁻¹ перпендикулярна к ней. Позднее гетерогенность фосфатных групп в апатите и наличие пирофосфатных групп было независимо установлено методом ЯМР высокого разрешения на ядрах ³¹P [7]. Мы полагаем, что полимеризация фосфатных групп в апатите происходит на дефектах структуры и процесс не является ни регулярным, ни периодическим.

Карбонатионы в апатите

Роль карбонатов в апатите – это одна из самых дискуссионных проблем. Существовали разные точки зрения: карбонатион не входит в структуру апатита, а принадлежит примесным минералам, карбонатион адсорбируется на поверхности кристаллитов. Известно, что этот ион препятствует кристаллизации и минералы, содержащие несколько весовых процентов карбонатных ионов, всегда микрокристалличны. Среди тех, кто полагал, что карбонатионы входят в структуру апатита, было много споров о том, сколько позиций имеют эти ионы и какие это позиции. На сегодняшний день многими авторами показано, что в апатите карбонатионы имеют две неэквивалентные позиции. В таблице 2 приведены особенности локализации карбонатионов в апатите.

Таблица 2. Особенности локализации карбонатионов в структуре апатита

Тип замещения	Локализация	Изменения параметра <i>a</i> элементарной ячейки	Частота колебаний в ИК спектре, см ⁻¹	Приблизительная ориентация карбонатиона	Условия образования
А	На гексагональной оси	Увеличение	880 1460 1540	Параллельно гексагональной оси	Высокие температуры
В	Вместо (PO ₄) ³⁻	Уменьшение	870 1430 1450	Перпендикулярно гексагональной оси	Осаждение в водной среде

5. Динамика кристаллической решётки апатитаМобильность анионов в каналах апатитовой структуры

Подвижность анионов в каналах вдоль гексагональной оси и их способность к диффузии была зафиксирована в работе [8], авторы которой превратили монокристалл хлорапатита в монокристалл гидроксилapatита. При термической обработке апатитов осадочного происхождения в структуре образуются водородные связи, при этом ионы фтора и гидроксильные группы сдвигаются вдоль оси. Мы обнаружили температурный

эффект в синтетическом гидроксилapatите: появление в ИК спектре дополнительной “горячей” полосы валентных колебаний ОН группы, причём любопытно, что явление имеет полностью обратимый характер. Подобная картина была зафиксирована на апатитах разного химического состава другими авторами. На её детали влияет тип катионных и анионных замещений. Подвижность гидроксильных групп меньше, чем фтора и кислорода.

Динамика ортофосфатных групп

Согласно данным ^{31}P ЯМР имеет место динамическая протонизация ортофосфатных групп [7]. Термическая обработка может вызвать конденсацию ортофосфатных групп в соответствии с реакцией: $2\text{HPO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_7$. Конденсация характерна для апатитов высокотемпературного происхождения, в осадочных образцах она происходит только после нагревания.

Динамика конденсации фосфатных групп в апатите очень важна с биологической точки зрения. Физиологическая функция низкомолекулярных полифосфатов, особенно пирофосфата, остаётся неясной.

Динамика карбонатных ионов

Динамика карбонатионов в апатите оказалась более сложной, чем думали ранее, так как нагревание вызывает не только удаление карбонатионов, но и сложный динамический процесс декомпозиции карбоната. Нагревание синтетических, биологических и минеральных апатитов в области $120\text{-}900^\circ\text{C}$ приводит к образованию газа CO_2 , что регистрируется появлением в ИК спектре полосы 2340 см^{-1} . Особенность динамики карбонатионов в апатите – это их способность к частичной перелокализации из одной структурной позиции в другую. Перелокализация карбонатионов из позиций ортофосфатных групп (так называемый В - тип замещения) на гексагональную ось структуры (А - тип замещения) легко регистрируется в ИК спектре по появлению новых полос поглощения при 880 и 1540 см^{-1} . Перелокализация карбонатионов на гексагональную ось зависит от количества фтора, который подавляет эту перелокализацию.

Если апатиты нагреваются в присутствии азотсодержащих соединений, возможно взаимодействие с азотом, приводящее к образованию цианатных и цианамидных групп (и появлению полос 2200 см^{-1} и 2012 см^{-1} в ИК спектре). Проблемы фиксации азота являются интересными не только для теоретических вопросов кристаллохимии, но в будущем будут важны и с практической точки зрения. Эти проблемы тесно связаны с динамикой карбонатионов в апатите.

6. Зависимость свойств апатитов от реальной кристаллохимической структуры

Определяющее влияние ближнего порядка в твёрдом теле на свойства кристалла проявляется в изменении свойств апатитов при различных изоморфных замещениях. Известно, что гидроксилapatит поглощает фтор даже из среды, бедной фтором. Вхождение фтора в структуру может приводить к образованию водородных связей. Водородные связи принадлежат к слабым взаимодействиям (их энергия $5\text{-}10$ ккал/моль), и поэтому они очень важны для фазовых переходов, процессов адсорбции и катализа. Водородные связи влияют на растворимость апатитов. Апатиты высокотемпературного происхождения всегда имеют водородные связи и значительно меньшую растворимость, чем минералы осадочного происхождения. Водородные связи угнетают диффузию вдоль оси структуры, активируют рост кристалла и его адсорбционную способность.

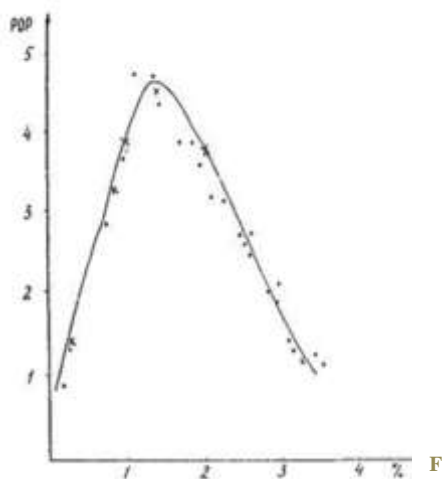


Рис. 2. Зависимость интегральной интенсивности полосы поглощения мостиковых связей Р-О-Р в ИК спектрах апатитов от содержания фтора (о-природные, х-синтетические образцы.)

Мы установили, что зависимость количества водородных связей в апатите от содержания фтора является экстремальной функцией. Способность ортофосфатных групп к конденсации также является экстремальной функцией от содержания фтора (рис. 2). Подобный характер носит зависимость целого ряда свойств апатита (протонная проводимость, удельная поверхность, кристалличность и др.) от содержания фтора. Такое двойное влияние фтора на свойства апатитов может быть связано с наличием двух типов фтора в структуре – образующих или не образующих водородные связи.

Пирофосфатные группы, содержащие лабильные связи Р-О-Р, активируют способность апатита к адсорбции, изменяют патологические процессы в зубной эмали.

Карбонатионы тоже оказывают сильное влияние на растворимость, кристалличность апатита, но это влияние может быть противоположным при локализации карбонатионов в каждой из двух

возможных позиций в структуре.

Катионные замещения в апатите даже при малых содержаниях заметно влияют на свойства, и это влияние зависит не только от типа и количества катионов, но и от их распределения по двум структурным позициям в Са I и Са II.

7. Технологические свойства апатитов

Мы изучили изменения фосфатных минералов из руд многих месторождений в различных технологических процессах извлечения и переработки руд. Интересующихся этим вопросом отсылаю к заказному обзору в *Reviews in Chemical Engineering* [9]. Приведу два примера. Первый пример – кислотнo-термическая переработка, широко применяемая при получении минеральных удобрений. Целью такой переработки является удаление фтора (токсичного элемента) из фосфатного минерала. Процесс был разработан и успешно применялся для Хибинских апатитов, содержание фтора в которых составляло 3% или больше. Когда перешли к апатитам из месторождения Ковдор, содержащим в два или три раза меньше фтора, ожидали ещё более успешного извлечения фтора. Однако удаления фтора не происходило. Технологический процесс включает инкубацию фосфатной руды при высоких температурах в присутствии пара и ортофосфорной кислоты. Исследование показало, что одной из причин затруднения удаления фтора из Ковдорского апатита является содержание большего количества водородных связей в Ковдорском апатите по сравнению с Хибинским. В Хибинском апатите образуются связи типа $\text{OH}\dots\text{F}$, в случае же Ковдорского апатита кроме них также образуются связи типа $\text{OH}\dots\text{O}$. При кислотнo-термической обработке увеличение содержания связей в Ковдорском апатите наблюдалось при увеличении температуры до 800°C . В случае Хибинских апатитов подобного явления не наблюдалось. Увеличение содержания водородных связей ингибировало диффузию вдоль гексагональной оси структуры. И только при 800°C , когда количество водородных связей начало уменьшаться в Ковдорском апатите, началось удаление фтора из структуры (рис.3).

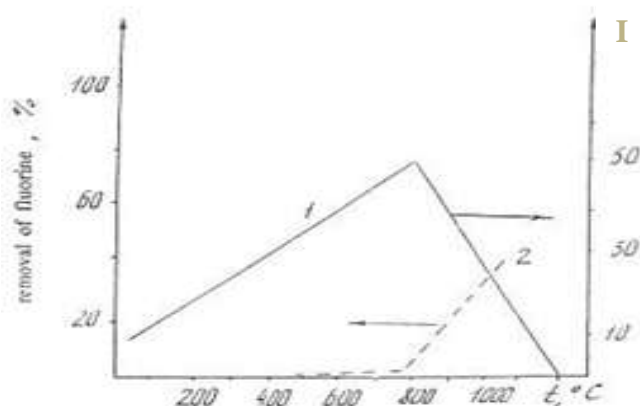


Рис.3. Интегральные интенсивности (I) полос поглощения 3540-3570 см⁻¹ (1) и удаление фтора (2) как функция температуры в процессе кислотно-термической обработки апатита из Ковдора.

Другой пример. Перед кислотно-термической переработкой фосфоритов с высоким содержанием карбонатных минералов часто используется обжиг руды. Карбонатные минералы при нагревании разрушаются, выделяющиеся CaO и MgO могут быть отделены от прокалённых руд после их гидравлической или пневматической классификации.

Термические превращения в фосфатных минералах из фосфоритов разных месторождений оказались одинаковыми: параметр a элементарной ячейки увеличивался на 0.05\AA , а параметр c уменьшался на 0.005\AA , апатитовая структура становилась

более регулярной, количество карбонатионов уменьшалось. Термическая обработка улучшала показатели последующей кислотной обработки: коэффициент разложения фосфатов увеличивался, расход серной кислоты уменьшался, скорость фильтрации осажённого фосфо-гипса увеличивалась, пенообразование в реакторах резко уменьшалось, влажность фосфо-гипса уменьшалась и т.д. Тем не менее, в отдельных случаях обжиг фосфоритов не приводит к улучшению их свойств для последующей кислотной переработки. Мы встречались с непонятным различным влиянием обжига на фосфориты с почти одинаковым химическим составом. Причиной, как правило, оказывались различия в реальной структуре фосфатных минералов. Интересным примером является влияние обжига на фосфориты месторождения *Nahal-Zin* в Израиле. Когда для улучшения свойств обожжённой руды пытались увеличить температуру обжига для более полного удаления карбонатов, свойства руды окончательно портились, и, несмотря на резкое уменьшение содержания карбонатов и улучшение кристалличности фосфатного минерала, продукт обжига вообще не мог быть использован для кислотной переработки.

С помощью методов *FTIR* (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье), рентгеновской дифракции и химического анализа удалось установить причину явления. Были изучены образцы до и после прокаливания от 600°C до 950°C и времени прокаливания от нескольких секунд до нескольких часов. В результате было показано, что карбонатионы в фосфатном минерале не только покидают структуру, но частично перелокализуются с позиций ортофосфатных групп на гексагональную ось. В освободившиеся вакансии PO_4 групп входят группы SO_4 и SiO_4 . Источником серы является органическое вещество фосфорита *Nahal-Zin*, богатое серой. Источником кремния – примесный кварц. От температуры 950°C пришлось отказаться, несмотря на более полное удаление карбонатов при этой температуре, так как даже мгновенный обжиг был достаточен для замещения P на S и Si, что кардинально меняло структуру и свойства фосфатного минерала [10].

Особенности реальной структуры апатита оказались типоморфными. Примером использования структурного типоморфизма является возможность обнаружения кимберлитовых трубок, в которых образуются алмазы. Кимберлиты – это вулканические породы, образующиеся глубоко внутри магмы. При анализе магнитных аномалий по результатам аэрогеофизической разведки важную роль маркёра на присутствие алмазов может сыграть апатит, являющийся сопутствующим минералом. Только апатит, характеризующийся наличием ОН...О связей, частичной конденсацией ортофосфатных

групп, люминесценцией Eu^{2+} , свидетельствует о возможной локализации алмазов. Если апатит имеет иные характеристики, поиск алмазов в этом месте не имеет смысла.

8. О роли апатита при решении некоторых медицинских проблем

К вопросу о невесомости. Я рискну описать результаты неоконченного исследования влияния невесомости на состояние костной ткани человека.

В институте космических исследований было начато изучение влияния невесомости на группе молодых здоровых юношей. Мы изучали образцы костей этих людей до и в течение эксперимента. Образцы получали с помощью специально изготовленных во Франции буров. Общей характеристикой динамики кристаллической решётки апатита для всех образцов костей оказалась частичная перелокализация карбонатионов с позиций ортофосфатных групп на гексагональную ось структуры; степень этой перелокализации увеличивалась по мере эксперимента и была различной для разных людей. Через две недели в образцах кости одного молодого человека произошла полная перелокализация, и в структуре апатита не осталось карбонатионов в позиции ортофосфатных групп. Этот молодой человек умер, и его смерть оказалась загадочной и совершенно неожиданной. Никаких причин медикам найти не удалось. Я пишу об этом с тайной надеждой, что кто-то прочтёт об этом и захочет продолжить исследование подобного процесса. По сложившимся трагическим обстоятельствам исследование было остановлено, и никакие данные не были опубликованы. Очень жаль.

К вопросу о мозговом песке. Долгое время считалось, что так называемый мозговой песок, расположенный в центре мозга, в эпифизе, является отбросом организма, а сам эпифиз – единственная часть мозга, не имеющая левой и правой части, – орган рудиментарный. В изучении эпифиза были взлёты и падения: от полного отрицания его роли до представления об эпифизе как о главном дирижёре всей эндокринной системы. В 1970-е годы в ряде стран (США, Франция, Румыния, Югославия, Англия) появился интерес к эпифизу. В настоящее время установлено, что эпифиз вырабатывает мелатонин, серотонин, норадреналин, гистамин. Основная функция эпифиза – регуляция суточных биоритмов, эндокринных функций, метаболизма и приспособление организма к меняющимся условиям освещённости. Ночной пик секреции мелатонина коррелирует с ночными импульсами магнитного поля Земли около 2 часов ночи. Получается, что организм человека с помощью эпифиза достаточно жестко сцеплён с гео- и гелиокосмическими процессами. Эпифиз чувствителен не только к магнитному полю, но также к миллиметровому диапазону волн, к инфра- и ультразвукам. Эпифиз моделирует активность гипофиза, панкреатических островков, паращитовидных желёз и щитовидной железы. Влияние эпифиза на эндокринную систему происходит через действие его гормонов на систему гипоталамус-гипофиз-гонады [11,12]. Эпифиз часто называли третьим глазом. Его устройство напоминает глаз. В эпифизе удаётся обнаружить хрусталик, стекловидное тело, подобие сетчатки, сосудистой оболочки и глазной нерв. Символ всевидящего ока всегда сопровождает мифологию, телепатию и телекинез. Известна американская учительница Эми Хансон, которая видит затылком.

Ещё в 18 веке основатель патанатомии, итальянский физиолог Морганьи высказал мнение, что мозговой песок, расположенный в эпифизе, связан с умом человека. Песок отсутствует у детей до 7 лет, у престарелых и у слабоумных. В последнее десятилетие установили, что эти песчинки являются апатитом [11]. Обнаружили, что эпифиз – главное место аккумуляции фтора F в организме. Фтора в мягких тканях в эпифизе оказалось 300 ppm, а в твёрдых (в гидроксилapatите) 21000 ppm, что больше, чем в зубах и костях [13]. Установлено, что с возрастом изменения в эпифизе носят более функциональный, чем органический характер [14]. Функция мозгового песка в эпифизе ещё ждёт своего исследования. Детальное кристаллохимическое исследование мозгового песка сможет

пролить свет на удивительную функцию этого песка, хотя ещё в прошлом веке учёные считали его отбросом организма.

О квантовом компьютере. Квантовый компьютер – это вычислительное устройство, работающее на основе квантовой механики. Построение квантового компьютера в виде реального физического прибора является фундаментальной задачей физики XXI века. Сейчас построены только ограниченные варианты квантовых компьютеров в пределах 10 кубит (Кубит – это основная квантовая единица информации). Первый прототип квантового компьютера был создан профессором *MIT* И. Чуангом с использованием метода ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на небольшом жидкостном процессоре. Интересна большая обзорная статья, посвящённая современным методам ЯМР применительно к квантовому компьютеру [15]. Методы ЯМР хорошо формализованы и являются прекрасным примером теоретических основ квантовых вычислений. Предлагалось создать твёрдотельный квантовый компьютер на монокристалле гидроксилapatита кальция, структура которого казалась очень привлекательной для этой цели [16]. Реализация этого предложения оказалась неосуществимой.

На пути к реализации полномасштабных квантовых компьютеров нерешённым остается целый ряд проблем как общезначимых, так и технического, и технологического характера. Пути решения некоторых из этих проблем предложены в [17].

Существует точка зрения, что квантовый компьютер, над созданием которого сегодня бьются учёные, уже давно реализован самой природой и вполне успешно функционирует в нашем головном мозге [18, 19]. Эпифиз является составной частью квантового компьютера в нашей голове, а мозговой песок в нём – это физическая основа квантового процессора. Сознание человека способно взять под свой контроль квантовый режим работы своего мозгового компьютера и научиться им управлять. Профессор МГУ, учёный - физикохимик Н.И. Кобозев (1903-1974) считал, что ”человек мыслит не по своей воле, а потому что у него есть эпифиз с мозговым песком, улавливающим космические излучения”. Профессор, доктор физико-математических наук И. Волович считает, что “сознание – это индивидуальный квантовый эффект”. Есть мнение, что мощный квантовый компьютер никогда не будет создан. Но даже и в этом случае исследования в этом направлении могут привести к неожиданным полезным открытиям, а значит, они должны и будут продолжаться. Будем надеяться, что дальнейшие физические исследования помогут найти ответ на самую интригующую тайну нашего бытия – что такое сознание и как оно функционирует.

Заключение

Реальная структура апатита значительно отличается от идеализированной модели: энергетическим разнообразием гидроксильных групп, неэквивалентностью различных позиций атомов фтора, частичной конденсацией ортофосфатных групп до пирофосфатных, локализацией карбонатионов в двух позициях - вместо ортофосфатных групп и на гексагональной оси структуры. Распределение ионов между различными позициями существенно влияет на свойства минерала. Каждый анион в апатите может переходить из одной позиции в другую при энергетическом воздействии на минерал. Решающее влияние на анионную подвижность в кристалле оказывает количество фтора на гексагональной оси.

Для предотвращения технологических сбоев в процессах извлечения и переработки фосфатного сырья и даже при поиске алмазов целесообразно кристаллохимическое изучение апатита. Детальное исследование апатита может оказаться полезным при решении таких медицинских проблем, как влияние невесомости на костную ткань, роль мозгового песка.

Словарь терминов

Магматические горные породы – породы, образовавшиеся непосредственно из магмы (расплавленной массы, образованной в глубинных зонах Земли) в результате её поступления в верхние горизонты Земли, охлаждения и застывания.

Метасоматические горные породы (от греческих слов: *metá-* за, после и *soma* - родительный падеж от *somatos* - тело). Это породы, образовавшиеся при замещении одних минералов другими с существенным изменением химического состава породы в процессе взаимодействия с жидкостями.

Осадочные горные породы – породы, возникшие в результате осаждения различных веществ в водной среде.

Изоморфные замещения (от греческих слов *iso* - одинаковый и *morphosis* - образовывать, принимать форму). Это замещения элементов в минералах без изменения формы кристалла.

Водородная связь – форма ассоциации между электроотрицательным атомом, например *N*, *O*, *F*, и атомом водорода *H*, связанным ковалентно с другим электроотрицательным атомом.

Валентные колебания – колебания молекул, основной вклад в которые вносят колебания ядер вдоль направления валентных связей.

Либрационные колебания (от латинского слова *libratio*-раскачивание) – колебания одного атома, раскачивающегося относительно другого.

Типоморфизм – явление зависимости свойств минерала от условий образования. Признаки минерала, по которым можно судить о тех или иных условиях его образования, называются типоморфными признаками.

Источники

1. Белов Н.В. Об изоморфных замещениях в группе апатита. – ДАН СССР, 1939, Т.22, №2, с.90-93.
2. Knubovets R. Afanasjev M. and Gabuda S. Hydrogen bond and ¹⁹F NMR chemical shift anisotropy in apatite. – Spectr. Letters, 1969, vol 2, №5, pp.121-125.
3. Кнубовец Р.Г., Габуда С.П. Исследование изоморфного замещения фтора на гидроксильную группу в апатитах методом ядерно-магнитного резонанса. В сб. Физика апатита. – Новосибирск: Наука, 1975, с.100-112.
4. Young R.A., W. van der Lugt, Elliot J.C. Mechanism for fluorine inhibition of diffusion in hydroxylapatite. //Nature, 1969, vol. 223, pp.729-730.
5. Кисловский Л. Д., Кнубовец Р. Г., Черенкова Г. И. Признаки конденсации тетраэдров в структуре апатита. – ДАН СССР, 1977, т.232, №3, с. 581-583.
6. Кнубовец Р. Г., Портнов Ф. М., Черенкова Г. И. Полимерная фосфатная группа в малофтористом апатите. – ДАН СССР, 1978, т. 243, №5, с. 1280-1282.
7. Rothwell W. P., Waugh J. S., Yesinovski J. P. High resolution variable temperature ³¹P NMR of solid calcium phosphates. – J.Amer-Chem.Soc., 1980, vol. 102, N8, pp.2637-2643.
8. Elliot J. C. and Young R. A. Conversion of single crystals of chlorapatite into single crystals of hydroxylapatite. //Nature, 1967, vol.214, pp.904-906.
9. Knubovets R. Structural mineralogy and properties of natural phosphates. – London: Reviews in Chemical Engineering, 1994, 9, 3-4, pp. 161-216.
10. Knubovets Rena et al. Calcination of Negev phosphorites and possible causes for technological problems. – Amsterdam: Phosphorus, Sulfur and Silicon, 1996, vol. 109-110, pp.51-54.

11. *Шматов О.В.* Об эпифизе. – Томск. Тезисы рефератов и докладов медицинской научно-практической конференции, 1-2 мая 1998, СГМУ, с. 42-45.
12. *Темурьянц Н., Щехоткин А., Насалович В.* Магниточувствительность эпифиза. - //Биофизика, 1998, т.43, вып.5. с. 761-765.
13. *Luke J.* PhD Thesis. The Effect of Fluoride on the Physiology of the Pineal Gland. – London, 1997, 298 pages.
14. *Хавонсон В. Х., Голубев С.Г.* Старение эпифиза. – //Успехи геронтологии, 2002, 3(9), 259. <http://www.medline.ru/public/art/tom3/art27.phtml>
15. *Vandersypen L.M.K., Chuang J.L.* NMR techniques for quantum control and computation. – // Rev. Mod. Phys., 2004, 76, p.1037.
16. *Feldman E.B., Lacelle S.* Perspectives on a Solid State NMR Quantum Computer. – 2001, archive.org:quant-ph/0108106.
17. *Кокин А.А.* Твёрдотельные ЯМР ансамблевые квантовые компьютеры. Исследование физических основ и проблем реализации. – М., 2003. <http://aakokin.chat.ru/autoref-htm>
18. *Доронин С.И.* Квантовый компьютер в головном мозге. Квантовая магия, 4.5. www.ppole.ru/doronin/Quantum Magic/4.5.html
19. Песок в мозге. <http://www.radosvet.net/spy/neob/2746-pesok-v-mozge.html>