

**Московский ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Государственный университет имени М. В.
Ломоносова**

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра кристаллографии и кристаллохимии.

КУРСОВАЯ РАБОТА

ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ В МИРЕ МИНЕРАЛОВ

Выполнила: студентка 105 группы

Сунгатуллина Н. В.

Научный руководитель:

доктор хим. наук, профессор Ерёмин Н.Н.

МОСКВА

2012 г.

Содержание

Введение	3
Литературный обзор:	
<i>I. Знакомство с определением «твердый раствор»</i>	4
• твердые растворы в мире минералов.....	5
• виды твердых растворов	7
• правила Уильяма Юм-Розери.....	8
• правила Виктора Морица Гольдшмидта.....	10
<i>II. Процесс образования твердых растворов-изоморфизм</i>	12
• открытие изоморфизма.....	12
• величина изоморфной емкости.....	13
• типы изоморфизма.....	14
• влияние температуры и давления на поведение твердых растворов.....	17
Заключение	20
Список используемой литературы	21

Введение

Твердые растворы??? Это подобно жидкому газу? Газообразному твердому веществу? Несколько странные, противоречивые словосочетания и едва ли возможно представить хотя бы одно из них в повседневной жизни или в физике. Однако, такая наука, как кристаллохимия расширит наши возможности, выйдя за рамки обыденного, мы получим все интересующие нас ответы об этом, на первый взгляд, немислимом веществе. Задача заключается в расшифровке и подробном изучении данного оксюморона - твердый раствор.

Целью данной курсовой работы является ознакомление с понятием «твердый раствор». Основная задача: рассмотрение твердых растворов в мире природных тел с определённым химическим составом и кристаллической структурой, образующихся в результате природных физико-химических процессов и обладающих определёнными физическими, механическими и химическими свойствами, иначе говоря-в мире минералов.

Еще одним аспектом для рассмотрения в курсовой работе является изоморфизм как процесс образования смешанных кристаллов - твердых растворов замещения.

Правила Уильяма Юм-Розери и Виктора Морица Гольдшмидта, открытия и догадки Эйльгарда Метчерлиха и Якоба Хендрика Вант-Гоффа будут представлены в моем научном труде.

Важной составляющей данной курсовой работы является статья Вадима Сергеевича Урусова и Николая Николаевича Еремина «Разработка и усовершенствование методов атомистического компьютерного моделирования твердых растворов замещения».

Твердые растворы.

Твёрдые растворы — фазы переменного состава, в которых атомы различных элементов расположены в общей кристаллической решетке. (см. рис.1). Это однородные твердые вещества, состоящие из нескольких компонентов, концентрации которых могут быть изменены в некоторых пределах при данных температуре, давлении и т. п. без нарушения однородности. Признаком образования твердого раствора является сохранение типа решетки компонента растворителя, сопровождающееся изменением размера элементарной ячейки. Таким образом, твердый раствор, состоящий из двух или нескольких компонентов, имеет один тип решетки и представляет собой одну фазу. Отсюда следует, что неограниченная растворимость возможна только в том случае, если исходные компоненты обладают решеткой одного типа.

Компоненты могут образовывать растворы неограниченной и ограниченной растворимости с разной степенью этого ограничения и разной температурной зависимостью предела насыщения раствора.

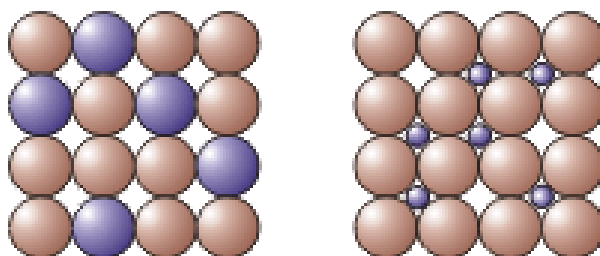


Рис.1. Твердый раствор

Каждый минерал характеризуется своей конституцией - только ему присущим определенным единством его кристаллической структуры и химического состава. Конституция минерала, по определению Дмитрия Павловича Григорьева, это его сущность как природного химического соединения. Вещества одного и того же состава, но разной структуры имеют, следовательно, разную конституцию. В физике и химии мы относим их к разным полиморфным модификациям, в минералогии считаем разными минералами. Так, природный углерод встречается чаще всего в двух полиморфных модификациях — в виде алмаза и графита (см. рис. 2). В первом атомы углерода "упакованы" плотно и скреплены сильными химическими связями, во втором атомы располагаются слоями, связи сложны. Естественно, что морфология кристаллов и физические свойства этих двух минералов резко отличаются. Известно по три и более природных полиморфных модификаций одного и того же химического состава. Каждая полиморфная модификация устойчива при своих значениях температуры, давления и химической обстановке в среде минералообразования.

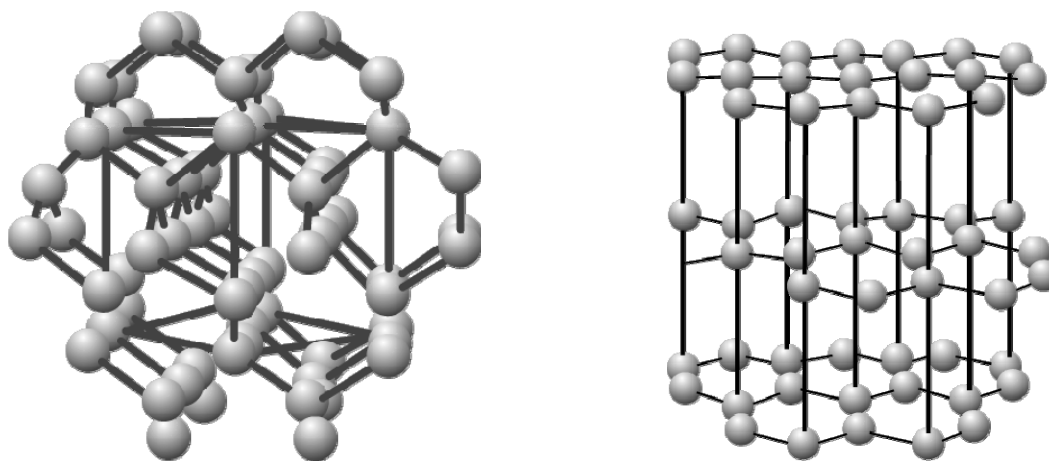


Рис. 2. Кристаллическая решетка алмаза и графита

Однако есть минералы разного состава, но одинакового структурного типа. Мы будем называть их изоструктурными соединениями. Таковы, например, гематит и корунд, висмутин и стибнит, касситерит, пиролюзит

рутил, шпинель и магнетит. Свойства и условия образования этих соединений различны, но по морфологии их кристаллы часто имеют много сходного между собой.

Наконец, среди некоторых изоструктурных минералов имеются соединения разного промежуточного состава, например шпинель, обогащенная железом



Рис. 3. Якоб Хендрик Вант-Гофф. В 1890 году ввел понятие «твердый раствор».

(Fe²⁺) за счет соответствующего недостатка в ней магния, или магнетит с химической примесью алюминия за счет соответствующего дефицита Fe³⁺. Такие минералы Якоб Хендрик Вант-Гофф (рис. 3) по первой их аналогии с водными истинными растворами назвал в 1890 г. **твердыми растворами**. В зависимости от количества химических примесей находятся свойства минерала, вид и характер огранки кристаллов,

изменяются его структурные особенности. Разные примеси входят в состав минерала в разных условиях его образования.

Виды твердых растворов.

Существует три вида твердых растворов:

- твердые растворы вычитания
- твердые растворы замещения
- твердые растворы внедрения

Твёрдые растворы *вычитания*, возникающие за счёт появления в кристаллической решётке вакантных узлов, образуются при растворении одного из компонентов в химическом соединении и характерны для нестехиометрических соединений. При образовании твердых растворов *внедрения* атомы растворенного компонента В размещаются между атомами растворителя А в его кристаллической решетке. При образовании твердых растворов *замещения* атомы растворенного компонента В замещают часть атомов растворителя (компонент А) в его кристаллической решетке.

Твердые растворы замещения могут быть с ограниченной и неограниченной растворимостью. В твердых растворах с ограниченной растворимостью концентрация растворенного компонента возможна до определенных пределов. В твердых растворах с неограниченной растворимостью возможна любая концентрация растворенного компонента (от 0 до 100%).

Правила Уильяма Юм-Розери

Правила Юм-Розери — ряд основных правил, определяющих способность химического элемента растворяться в металле с образованием твёрдого раствора. Существует две формулировки этих правил, определяющие возможность образования твёрдых растворов *замещения* и *внедрения*. Названы по имени открывшего их английского металловеда Уильяма Юм-Розери. (см. рис 4.)



Рис.4 Уильям Юм-Розери

Правила для твердых растворов замещения

Для твёрдых растворов *замещения* (рис. 5а) правила Юм-Розери следующие:

1. Растворимость возможна, если кристаллические решётки растворённого элемента и растворителя одинаковы.
2. Образование твёрдого раствора возможно, если атомные радиусы растворённого элемента (r_{solute}) и растворителя (r_{solvent}) отличаются не более, чем на 15 %:

$$\% \text{ difference} = \left(\frac{(r_{\text{solute}} - r_{\text{solvent}})}{r_{\text{solvent}}} \right) * 100 \leq 15\%$$

3. Максимальная растворимость достигается, если растворяемый элемент и растворитель имеют одинаковую валентность, причем металлы с меньшей валентностью стремятся раствориться в металлах с большей валентностью.

4. Растворённый элемент и растворитель должны иметь близкую электроотрицательность (различие не должно превышать 0.2-0.4), в противном случае рассматриваемые элементы вместо твёрдых растворов склонны к образованию интерметаллических соединений.

Правила для твёрдых растворов внедрения

Для твёрдых растворов *внедрения* (рис. 5 б) правила Юм-Розери следующие:

1. Атом растворённого элемента должен иметь атомный радиус меньший, чем размер пустот (пор) в кристаллической решётке растворителя, но быть больше размера самой маленькой из возможных пор — тетраэдрической поры, то есть должно выполняться правило Хэгга:

$$0.25 \cdot r_{\text{solvent}} \leq r_{\text{solite}} \leq 0.59 \cdot r_{\text{solvent}}$$

2. Растворённый элемент и растворитель должны иметь близкую электроотрицательность.

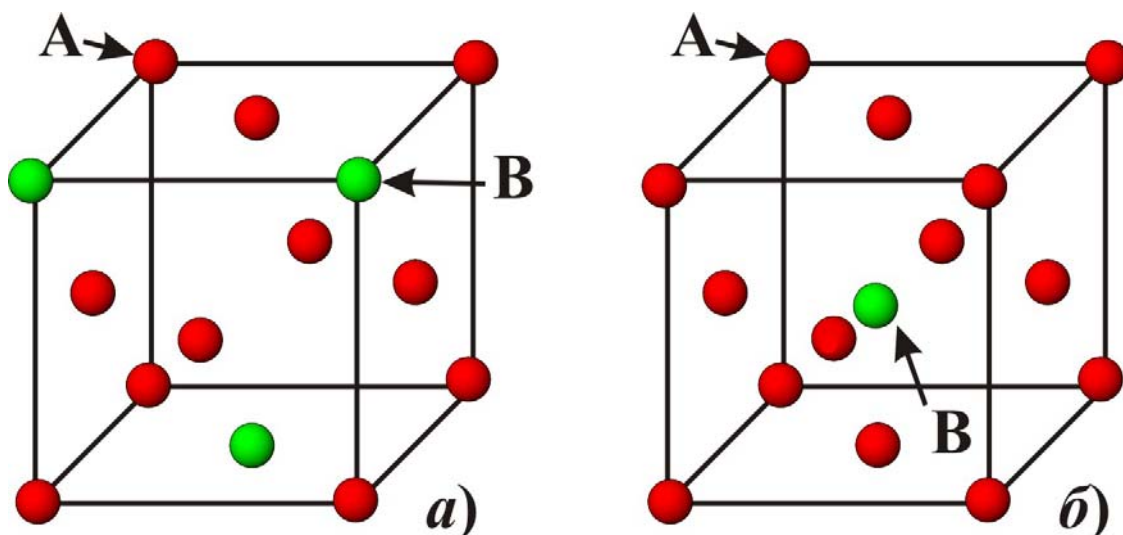


Рис. 5. Твёрдые растворы а) замещения; б) внедрения

Правила Виктора Морица Гольдшмидта

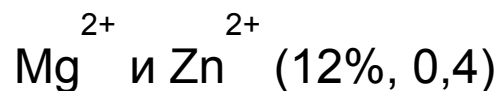
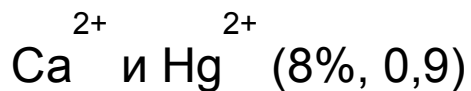


Рис.6 Виктор Морис Гольдшмидт

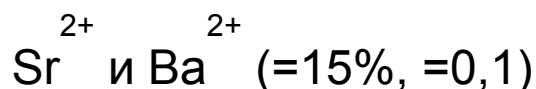
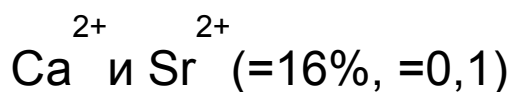
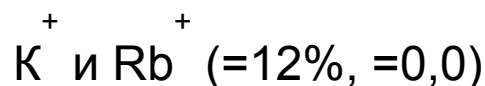
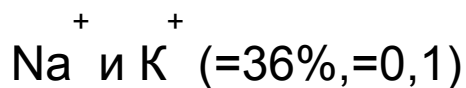
Заслуженной В. М. Гольдшмидта (рис. 6) является формулировка основных эмпирических правил изоморфизма. Среди них наиболее известно следующее эмпирическое правило: изоморфные смеси ионных кристаллов образуются в широких пределах при температурах, лежащих далеко от точки плавления, если (ионные) радиусы взаимозамещающихся структурных единиц различаются не более чем на **15%** (от меньшего

значения). Аналогом его для металлических и ковалентных кристаллов можно считать правило 15%-ной разницы атомных диаметров Юм-Розери. Опыт показывает, что если разница атомных радиусов превышает предельное значение 15%, существование широких областей твердых растворов становится очень маловероятным, когда же она меньше 15%, важное значение могут приобрести другие факторы, которые могут помешать ожидаемой высокой растворимости. Область, наиболее благоприятная для образования твердых растворов, ограничивается разностью электроотрицательностей $\pm 0,4$ и 15%-ной разницей атомных радиусов. Именно различием электронного строения атомов и разным характером образуемых ими химических связей нужно объяснить отсутствие или чрезвычайную ограниченность изоморфизма таких весьма близких по размерам, но отличающихся по электроотрицательности пар, как





несмотря на наличие широких или даже непрерывных изоморфных рядов соединений с той же или большей разностью в размерах, но с меньшей разностью электроотрицательностей.



Другим важным эмпирическим обобщением явились представления о направленности, «полярности» изоморфизма. Так, в случае изовалентных замещений правило полярности Гольдшмидта гласит: ион с меньшим радиусом будет входить в общую кристаллическую структуру легче, чем ион с большим радиусом занимающий ту же позицию. Например, Na^+ ($r = 0,98\text{\AA}$) должен охотнее замещать K^+ ($r = 1,33\text{\AA}$) в KCl , чем более крупный K^+ будет замещать Na^+ в NaCl .

В случае гетеровалентных замещений действует другое правило полярности Гольдшмидта: ион с большим зарядом входит в кристалл легче, чем ион с меньшим зарядом, занимающий ту же кристаллографическую позицию. Например, Mg^{2+} может замещаться на Sc^{3+} , а обратное замещение маловероятно.

Изоморфизм

Изоморфизмом называется взаимное замещение атомов (или их групп) разных химических элементов в эквивалентных позициях кристаллической структуры. Изоморфизм приводит к образованию **смешанных кристаллов**, состав которых в определенных пределах изменяется непрерывно и постепенно. У термина «смешанный кристалл» имеются еще два синонима, используемых чаще. Один из них - **изоморфная смесь** - встречается в основном в минералогической и геохимической литературе.

Второй - **твердый раствор замещения** - широко употребляется в физической химии и физике твердого тела.

Содержание указанных терминов совпадает не полностью. Так, понятия «изоморфизм» и «изоморфная смесь» включают в себя и те сложные случаи замещения, когда бывает трудно указать, какие именно компоненты образуют смешанный кристалл. Кроме того, изоморфизм допускает как статическую, так и динамическую трактовку. Изоморфизм с точки зрения динамики заключается в описании пути изоморфной примеси в различных процессах кристаллизации.

Открытие изоморфизма



Рис.7 Эйльгард
Митчерлих

Молодой немецкий химик и кристаллограф Эйльгард Митчерлих (см.рис.7) (1794 - 1863), который также известен своим достижением в области химии: в 1833 году он получил сухой бензол при перегонке кальциевой соли бензойной кислоты, профессор химии Берлинского Университета, совершил огромный вклад и в науку кристаллографию, открыв изоморфизм в 1819 г., а в 1821 г. - полиморфизм.

Величина изоморфной емкости.

При замещении в кристалле более мелкого атома (иона) на более крупный или, наоборот, более крупного на более мелкий возникают искажения (деформации) кристаллической структуры. Внедрение в позицию, занимаемую данным ионом, более крупного влечет за собой деформацию — расширение кристалла, при этом параметры его элементарной ячейки увеличиваются. Напротив, если на место иона-хозяина внедряется более мелкий, деформация структуры проявляется в сжатии — параметры элементарной ячейки кристалла уменьшаются. Каждая кристаллическая структура имеет свой предел прочности по отношению к деформациям типа растяжения или сжатия, и этим определяется предел устойчивости данной структуры (минерала) при образовании твердого раствора. Если величина деформации в результате изоморфного замещения оказывается больше, чем это может выдержать структура (больше предела ее прочности на сжатие или растяжение), химические связи в кристалле должны разорваться, и поэтому твердый раствор образоваться не может. Величина деформации при образовании твердого раствора определяется разницей в размерах замещающих друг друга атомов (ионов), с одной стороны, и свойствами упругости (податливости) структуры к растяжению или сжатию — с другой. Эти свойства кристалла изменять свои размеры под действием сжатия или расширения характеризуются сжимаемостью и термическим расширением.

Таким образом, изоморфная емкость структуры зависит от ее свойств — сжимаемости и термического расширения, с одной стороны, и от разницы в ионных радиусах замещающих друг друга элементов — с другой. В конечном счете все напряжения в структуре твердого раствора, вызванные смещением разнородных атомов в одних и тех же позициях, приводят к эндотермическому (затратному) тепловому эффекту, который понижает устойчивость твердой смеси. Это порождает как раз тот самый фактор, который действует в противоположном энтропии направлении и затрудняет образование смешанных кристаллов.

Типы изоморфизма

Когда говорят о валентностях атомов, изоморфно замещающих друг друга в соединениях, следует различать два случая.

Изовалентный изоморфизм.

Наиболее простым типом изоморфизма является изовалентный изоморфизм, то есть явление изоморфного замещения между атомами с одинаковой валентностью. Примерами изовалентных замещений являются все замещения между атомами одной и той же группы Периодической системы Менделеева, например K — Rb, Ca — Sr, Ti — Sn, Mo — W и т.д.

Гетеровалентный изоморфизм.

Возможности замещений столь многообразны, что даже атомы с разной валентностью способны образовывать так называемые гетеровалентные твердые растворы. Как же удастся кристаллу сохранить стабильность без того, чтобы претерпеть структурные изменения в результате гетеровалентных замещений? Удобнее всего рассмотреть это на примере ионного кристалла. Кристаллические соединения с ионным характером химической связи построены не из электронейтральных частиц — атомов, а из электрически заряженных ионов, которые или имеют положительный заряд (катионы), или заряжены отрицательно (анионы). В наружной электронной оболочке катионов по сравнению с электронной оболочкой электронейтральных атомов данного элемента часть отрицательно заряженных частиц — электронов отсутствует. Эти электроны покинули электронную оболочку для образования химической связи в кристалле, и в результате атом приобретает положительный заряд (+) и становится катионом. Наоборот, анионы — это ионы атомов, присоединивших к своей электронной оболочке дополнительные электроны, заимствуя их у катионов, и в результате анионы приобретают отрицательный заряд (-).

Кристалл как единое целое может существовать только как электронейтральное образование: суммарный положительный заряд катионов всегда равен по абсолютной величине суммарному отрицательному заряду

анионов. Пусть кристалл имеет химическую формулу $A_nB_mC_k$, где А и В — катионы с валентностями a и b соответственно, а С — анион с валентностью c . Тогда условие электронейтральности этого кристалла выглядит следующим образом: $an + bm = ck$. Если, например, $n = m = 1$, $a = b = 2$, получим формулу соединения $A^{2+}B^{2+}(C^{2-})_2$. Суммарный положительный заряд в этом случае равен + 4, а суммарный отрицательный заряд - 4.

Представим себе, что вместо двухвалентного иона B^{2+} в структуру изоморфно входит трехвалентный ион D^{3+} . Если он полностью заместит В, то есть займет все позиции в кристалле, занятые ранее ионами В, а количества А и С при этом не изменятся, то электронейтральность кристалла нарушится: суммарный положительный заряд станет равен $1 \cdot 2 + 1 \cdot 3 = +5$, тогда как суммарный отрицательный заряд сохранится прежним (- 4). Кристалл стал бы положительно заряженным, а такое соединение существовать не может. Значит ли это, что замещение двухвалентного А на трехвалентный D вообще невозможно? Нет, не значит, и существует несколько способов компромиссного выхода из этой ситуации. Прежде всего это парное замещение между ионами, имеющими заряд одинакового знака, когда одновременно происходит замещение на более высоковалентный ион и ион с более низкой валентностью. Скажем, при замещении B^{2+} на D^{3+} в структуру одновременно вместо A^{2+} изоморфно входит ион G^{+} . Электронейтральность кристалла в этом случае сохраняется. Примеры таких парных гетеровалент-ных замещений хорошо известны в мире кристаллов. Так, в структуру сфалерита ZnS на места Zn могут успешно входить одновременно Cu^{+} и Fe^{3+} в пропорции 1 : 1, что не нарушает принципа электронейтральности. Столь же удобен вариант появления в этом кристалле пар In^{3+} на месте Zn^{2+} и As^{3-} на месте S^{2-} , что также не меняет общего условия баланса зарядов. Здесь следует сделать важное примечание. Дело в том, что кристаллы типа сфалерита ZnS не являются чисто ионными и не вполне корректно приписывать атомам в таких соединениях целочисленные заряды, как ионам. Однако численные значения величин зарядов равны

валентностям, в этом смысле не будет сделано никакой ошибки, если вместо понятия баланса (или компенсации) зарядов (как в ионных кристаллах) мы будем пользоваться гораздо более общим понятием баланса (или компенсации) валентностей.

Другой способ не нарушить электронейтральность кристалла при вхождении гетеровалентной примеси заключается в изменении числа катионов (или анионов) в формуле без изменения самой кристаллической структуры. В этом случае образуются *вакансии* в кристаллической решетке, то есть часть ионов покидает структуру, оставляя вместо себя пустоты — незанятые позиции (вакансии). Образуется дефектный твердый раствор с дефицитом катионов (или, что реже, анионов): $(A^{2+})_1(B^{2+})_1(C^{2-})_2 \rightarrow (A^{2+})_0.5(D^{3+})_1(C^{2-})_2$ и в структуре остается 0,5 занятых А-позиций с образованием 0,5 вакантных А-позиций. Необходимо сказать, что в таких случаях, когда концентрация структурных вакансий достигает большой величины, кристаллическая структура часто становится неустойчивой и в ней появляются области неоднородного распределения вакансий, то есть возникают зоны сегрегации (скопления) вакансий внутри гомогенного кристалла. Очень хорошо изучены в этом отношении, в том числе с применением электронной микроскопии высокого разрешения, минералы группы пирротина $Fe_{1-x}S$. В этой формуле $x > 0$ означает долю вакантных позиций атомов Fe, появляющихся за счет окисления $2x$ атомов двухвалентного железа и перехода их в трехвалентное состояние. Если доля $2x$ велика (больше или около 10%), то появляются стехиометрические фазы типа Fe_7S_8 , в структуре которых вакансии скапливаются в отдельных плоских сетках, протягивающихся через всю структуру. Предельное число вакансий, которое может аккумулировать в себе данная структура, оставаясь устойчивой, различно для разных структур.

Влияние температуры и давления на поведение твердых растворов.

Кристаллы, которые нас окружают, будь то искусственные или природные соединения (минералы), существуют в тех же условиях температуры и давления, что и живое вещество Земли, а именно при 1 атм и температурах, колеблющихся в пределах нескольких десятков градусов относительно 0°C . В подавляющем большинстве случаев температура и/или давление их образования (кристаллизации) совершенно иные. Кристаллы, а следовательно, и твердые растворы образуются в процессе кристаллизации из расплавов, растворов или при конденсации из газовой фазы, и температуры, при которых это происходит, гораздо выше температуры окружающей нас среды. Очевидно, что физико-химические параметры — температура T и давление P — изменяют свойства кристаллической структуры и поэтому являются факторами, определяющими изоморфное поведение элементов. Иными словами, не только свойства замещающих друг друга ионов и не только тип кристаллической структуры, в которой это происходит, являются ответственными за то, будут или нет образовываться твердые растворы, а если будут, то будут ли они непрерывными, или же концентрации изоморфной примеси окажутся ничтожно малыми.

Как же влияют температура и давление на пределы изоморфной смесимости? Ответ на вопрос о влиянии температуры простой, и, как следует из предыдущих рассуждений о роли энтропийного фактора - TS_k , температура всегда содействует расширению пределов взаимной смесимости. Наоборот, при остывании твердого раствора происходит выделение из него избыточной доли изоморфной примеси с образованием двух фаз разного состава, одна из которых обогащена, а другая обеднена данной изоморфной примесью. При этом часто образуются кристаллографически ориентированные срастания этих фаз, которые называются структурами распада. Что касается роли давления, то однозначного ответа не существует. Правда, дело обстоит намного проще, если при образовании твердого

раствора сильно изменяется объем по сравнению с объемом смеси чистых фаз, взятых в том же количественном соотношении. Если при этом объем твердого раствора увеличивается, то по правилу Ле Шателье увеличение давления будет способствовать распаду раствора, а если объем твердого раствора меньше объема смеси чистых компонентов, то, наоборот, давление будет способствовать расширению пределов устойчивости твердого раствора. Если же объемы при замещении меняются мало, как это часто бывает, то определить априорно роль давления затруднительно и для этого необходимы специальные, иногда весьма трудоемкие эксперименты.

В тех случаях, когда поведение твердого раствора под влиянием изменения T и P известно или может быть предсказано, это можно использовать для решения обратной задачи, а именно для определения неизвестных температур и давления процесса кристаллизации по составу твердого раствора. На этом основаны методы генетической минералогии и петрологии: геотермометрия и геобарометрия .

Рассмотрим несколько примеров применения таких геотермометров и геобарометров. Если мы знаем, например, что в составе кальцита, составляющего главную часть всем известных мраморов, с ростом температуры увеличивается количество Mg, то можно по составу мрамора определить температуру его кристаллизации. Известно также, что величина x в формуле пирротина $Fe_{1-x}S$ заметно увеличивается с ростом температуры. Определив x с помощью химического анализа, можно установить температуру образования кристаллов пирротина с точностью примерно до $25^{\circ}C$. Много усилий экспериментаторов было потрачено на то, чтобы установить, как влияет давление на количество Fe в структуре сфалерита ZnS . Поскольку в этом случае вхождение железа в структуру сфалерита сильно увеличивает общий объем системы, то повышение давления уменьшает количество железа в составе твердого раствора. Сейчас известно с большой степенью точности, какова эта зависимость, и поэтому можно по составу сфалерита

установить, при каких давлениях он образовался. В частности, такие оценки очень важны для изучения метеоритов. Это открывает путь для определения размеров астероидов — родительских тел, из которых образовались метеориты, упавшие на Землю. Таким образом, состав сфалерита оказывается одним из наиболее эффективных космобарометров.

Знание природы смесимости в твердом состоянии имеет большое значение как для физики и химии синтетических веществ (в частности, для неорганического материаловедения), так и для наук о Земле — минералогии и геохимии. В природе практически невозможно найти чистые кристаллические минералы, все они представляют собой смеси — твердые растворы, иногда очень сложные по составу и структуре. Именно взаимной смесимостью в твердом состоянии главным образом и обусловлено то распределение химических элементов, которое зафиксировано составом оболочек Земли, горных пород, руд и минеральных фаз.

Заключение

Итак, мы выполнили все поставленные задачи и получили ответы на все интересующие нас вопросы. Мы узнали, что такое твердый раствор. Как он образуется (благодаря какому процессу и при каких условиях этот процесс проходит), узнали о том, что твердые растворы бывают нескольких видов и даже совершили путешествие в глубины кристаллических решеток.

В заключении хотелось бы вернуться в повседневный мир и немного рассказать о полезных свойствах твердых растворах и их применении.

Итак, как мы уже выяснили, природные минералы часто представляют собой твердые растворы. Образование твердых растворов при легировании элементов и соединений имеет большое значение в производстве сплавов, полупроводников, керамики, ферритов.

Твердые растворы — основа всех важнейших конструкционных и нержавеющей сталей, бронз, латуней, алюминиевых и магниевых сплавов высокой прочности. Свойства твердых растворов регулируют их составом, термической или термомеханической обработкой. Легированные полупроводники и многие сегнетоэлектрики, являющиеся основой современной твердотельной электроники, также являются твердыми растворами.

При распаде твердых растворов сплавы приобретают новые свойства. Наиболее ценными качествами обладают сплавы с очень тонкой неоднородностью — так называемые дисперсионно-твердеющие, или стареющие твердые растворы. Дисперсионное твердение может наблюдаться и при распаде твердых растворов на основе соединений, например, нестехиометрических шпинелей.

Таким образом, твердые растворы представляют большую важность в нашей жизни, а потому их существование в мире минералов является не только оправданным, но и чрезвычайно продуктивным.

Список используемой литературы:

1. *Урусов В.С.* Статьи соросовского образовательного журнала
2. *Костов И.* Кристаллография. М.:Мир, 1995
3. *Урусов В.С.* Теория изоморфной смесимости. М.:Наука, 1977
4. *Патнис А., Мак-Коннел Дж.* Основные черты поведения минералов. М.:Мир, 1983
5. *Хисина Н.Р.* Субсолидусные превращения твердых растворов породообразующих минералов. М.:Наука, 1987
6. *Балабин А.И., Урусов В.С.* //Геохимия. 1994 №4. С. 580-596
7. *Урусов В.С., Петрова Т. Г., Еремин Н. Н.* Доклады РАН, 2002. №2. Т.387. С. 1-5
8. *Урусов В.С., Петрова Т. Г., Еремин Н. Н.* Доклады РАН, 2003. №1. Т.392. С. 1-6
9. *Урусов В.С, Леоненко Е.В., Петрова Т.Г., Еремин Н.Н.* Вестник Московского Университета. 2007. Сер.4(Геология) №2 С.58-63
10. *Урусов В.С., Петрова Т.Г., Еремин Н.Н.* Кристаллография, 2008. В печати.
11. *Еремин Н.Н., Талис Р.А., Урусов В.С.* Кристаллография, 2008. 53, №5. С.821-829
12. *Урусов В.С., Таусон В.Л., Акимов В.В.* Геохимия твердого тела. М.:ГЕОС, 1997. 500с.
13. *Урусов В.С., Еремин Н.Н, Петрова Т.Г., Талис Р.А.* 4-ая Национальная кристаллохимическая конференция, Черноголовка. Сборник тезисов, 2006.С.238
14. *Асланов Л.А.* Структуры веществ. М.: Изд.МГУ, 1989.160с
15. *Борисов С.В., Клевцова Р.Ф., Магарилл С.А., Первухина Н.В., Подберезская Н.В.* Журнал структурной химии. 2002. Т.43, №4. С.664-670.
16. *Урусов В.С., Кузнецов Л.М., Хисина Н.Р.* Доклады Академии Наук. 1993. Т.329 №2. С.216-220.
17. *Урусов В.С., Кузнецов Л.М., Бенделиани Н.А., Атабаева Э.Я., Цыгунов А.Н.* Доклады Академии Наук. 1986. Е.282. С.182-186