

мых некарбонатных минералов или некарбонатные минералы, относительно легко поддающиеся замещению. На рис. 7, ж сравниваются два типа микрорельефа, со слабым и сильным меандрированием слоев роста в углублениях и около них.

Таким образом, особенности микрокристалломорфологии байкалита несут информацию о его росте метасоматическим путем при сопряжении с перекристаллизацией вмещающей породы, что соответствует тесной связи процессов перекристаллизации и метасоматизма [14].

Метакристаллы байкалита обладают многообразием проявлений особенностей микрокристалломорфологии метасоматического роста минералов, и их метакристаллы могут рассматриваться как своеобразные модели при изучении и демонстрации микрокристалломорфологии метасоматического роста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологический журнал. СПб., 1809, т. 1, ч. 1
2. Раскин Н.М., Шафрановский И.И. Эрик Густавович Лаксман, выдающийся путешественник и натуралист XVIII в. Л.: Наука, 1971.
3. Кокшаров Н.И. Материалы для минералогии России. 1862, т. 4.
4. Флогопитовые месторождения Слюдянского района (Южное Прибайкалье). М.; Л.: ГОНТИ, 1939.
5. Коржинский Д.С. Биметасоматические флогопитовые и лазуритовые месторождения архея Прибайкалья. — Тр. Ин-та геологии АН СССР, 1947, вып. 29, петрогр. серия (№ 10).
6. Калинин П.В., Роненсон Б.М. Геолого-структурные особенности и генезис Слюдянских флогопитовых месторождений. — Сов. геология, 1957, № 58.
7. Резницкий Л.З. Минеральные ассоциации магнезиальных скарнов Слюдянских флогопитовых месторождений. — В кн.: Минералогия Прибайкалья. Путеводитель Байкал. экскурсии 11-го съезда Международной минералогической ассоциации, 1978. Иркутск, 1978.
8. Kokscharow N. Materialien zur Mineralogie Russlands. 1878, Bd. 5.
9. Крылова С.К. К кристаллографии байкалита. — Тр. ЛИГЕМ АН СССР, т. 7.
- 10.
11. Фекличев В.Г. Микрокристалломорфологические исследования. М.: Наука, 1970.
12. Фекличев В.Г. Микрокристалломорфологический анализ. — М.: Наука, 1966.
13. Фекличев В.Г. Анизотропия кристаллизационного давления у растущего метакристалла. — Докл. АН СССР, 1982, т. 264, № 6.
14. Ланда Э.А. К вопросу об условиях образования метакристаллов и бластокристаллов. — Тр. Всес. н.-и. геол. ин-та, 1979, т. 287.

УДК 549.752/757 + 552.322.2

Л.Г. ФЕЛЬДМАН, Т.Б. ЗДОРИК

О ВЗАИМООТНОШЕНИЯХ МИНЕРАЛОВ СТРУКТУРНЫХ ТИПОВ ПИРОХЛОРА И КОЛУМБИТА В РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ КАРБОНАТИТАХ И ПЕГМАТИТАХ

Соотношения редкометальных карбонатитов и пегматитов недавно были рассмотрены в общем виде авторами совместно с А.И. Гинзбургом [1]. Проведенный анализ показал, что при всех очевидных различиях этих двух больших групп месторождений, между ними констатируются и определенные черты сходства, имеющие принципиальный характер и относящиеся к некоторым их существенным генетическим особенностям, а точнее — к условиям минералообразования в пегматитах и карбонатитах. Одним из таких моментов, сближающих их между собой, является широкое развитие в тех и других танталониобатов структурных типов пироклора и колумбита.

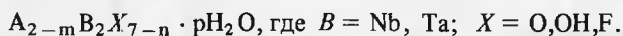
Как известно, с редкометальными карбонатитами и пегматитами связаны высокие концентрации ниобия и тантала в земной коре, вследствие чего к этим генетическим группам принадлежат важные промышленные типы месторождений указанных металлов [2]. Ведущую роль в составе тантало-ниобиевого оруденения как в карбонатитах,

так и в пегматитах играют в большинстве случаев минералы групп пирохлора и колумбита, — что создает необходимые предпосылки для сравнительного рассмотрения особенностей их эволюции в карбонатитовом и пегматитовом процессах.

Такая сопоставительная характеристика может служить частной, но весьма наглядной иллюстрацией и вместе с тем конкретизацией общих положений, выдвинутых в работе [1], на очень показательном минералогическом материале.

Карбонатиты

На ранних стадиях карбонатитового процесса, когда формируются меланократовые кальцитовые карбонатиты или фостерит-апатит-магнетитовые породы (камафориты, фоскариты), главным минералом-концентратором ниобия и тантала является темно-бурый пирохлор, по составу близкий гатчеттолиту, т.е. отличающийся повышенными содержаниями тантала (до 9–12% Ta_2O_5 , редко более) и урана, обычно также титана и иногда тория [3]. Отношение пятиоксидов тантала и ниобия в гатчеттолите варьирует от 1 : 4 до 1 : 8. В карбонатитах гатчеттолит, как правило, образует октаэдрические (иногда с узким поясом ромбододекаэдра) кристаллы и их сростки, в апатит-магнетитовых рудах — чаще тонкую вкрапленность зерен неправильной формы, но в общем также октаэдрического габитуса. В химическом составе гатчеттолита обычно отмечается значительный дефицит катионов группы А (в связи с вхождением высокозаряженных ионов радиоактивных элементов U^{4+} , Th^{4+} , и его кристаллохимическая формула имеет вид:



В естественном состоянии минерал почти всегда рентгеноаморфен (вследствие метааморфности), после прокаливании дает дифракционную картину, отвечающую неупорядоченной пирохлоровой структуре ($a_0 = 0,515–0,518$ нм; пространственная группа $Fm\bar{3}m$) либо — при далеко зашедшей аморфизации — серии возникающих вторичных фаз: ферсмиту, фергусониту и др.

В ходе карбонатитового процесса состав и конституция пирохлора претерпевают закономерные изменения; содержание тантала и урана в нем снижается, и минерал приближается к собственно пирохлору — $CaNa Nb_2 O_6 F$, с тантало-ниобиевым отношением порядка 1 : 100–1 : 200. Иногда, впрочем, возникают также разности, несколько обогащенные цериевыми землями и (или) торием ($Ca, Th TR_{Ce} Na$)₂ $Nb_2 (O, OH, F)$ ₇.

Существенно ниобиевый пирохлор "нормального" состава более характерен для лейкократовых кальцитовых карбонатитов (севитов). Такой пирохлор имеет более светлую желтовато-бурю окраску, часто довольно крупных (3–5 см, иногда до 1–2 см), причем в более крупнозернистых карбонатитах, как правило, присутствует и более крупнокристаллический пирохлор. Этот же пирохлор обрастает гатчеттолит и отчасти развивается по нему, образуя тонкие периферические зоны на кристаллах гатчеттолита. При этом габитус кристаллов может меняться от октаэдрического до кубоктаэдрического; иногда кубоктаэдрические кристаллы желтовато-бурого пирохлора включают в себя фантомы кристаллов темно-бурого, почти черного гатчеттолита октаэдрического габитуса [4]. Пирохлор II "нормального" состава дает в естественном состоянии (без термообработки) четкую дифракционную картину упорядоченной пирохлоровой структуры ($a_0 = 1,040–1,042$ нм; пространственная группа $Fd\bar{3}m$).

В мелкозернистых полосчатых амфибол-кальцитовых и отчасти доломитовых карбонатитах также присутствует светлый существенно ниобиевый пирохлор, но в виде более мелкой вкрапленности.

В дальнейшем, по мере смены кальцитовых и доломитовых карбонатитов анкеритовыми (и иногда сидеритовыми), отражающей снижение основности минералообразующих растворов [5] и повышением активности в них железа, начинается [3] колумбизация пирохлора (с образованием в качестве промежуточной фазы ферсмита $Ca Nb_2 O_6$).

При этом в наибольшей мере подвергаются колумбитизации гагчеттолитовые разновидности пирохлора, которые, следовательно, оказываются менее устойчивыми к воздействию гидротермальных растворов по сравнению с пирохлором П "нормального состава" (он, конечно, тоже претерпевает фермитизацию и колумбитизацию, но в гораздо меньшей степени). Развитие колумбита по гагчеттолиту сопровождается удалением тантала, и колумбиты из карбонатитов, безотносительно к тому, возникали они по гагчеттолиту, пирохлору или кристаллизовались самостоятельно (вне видимой связи с более ранними танталониобитами), всегда представляют собой существенно ниобиевые ферроколумбиты ($\text{FeO}/\text{MnO} \geq 3$, обычно ~ 12 ; см [3, 6, 7]). Бедность колумбитов из карбонатитов марганцем обусловлена геохимической спецификой карбонатитового процесса, для которого марганец вообще не характерен (в силу генетической связи карбонатитов со щелочными производными преимущественно ультраосновных и основных магм), но зато характерна высокая активность железа (вплоть до формирования крупных магнетитовых месторождений) и магния.

Преобладающая форма нахождения колумбита в карбонатитах — своеобразные губчатые псевдоморфозы по пирохлору (гагчеттолиту); наряду с ним (или несколько позже), обычно в подчиненном количестве, колумбит образует и самостоятельные кристаллы, а чаще — их сростки.

Прежде чем перейти к морфологическим особенностям кристаллов колумбита в карбонатитовых комплексах необходимо оговориться, что в данной работе все кристаллографические индексы, относящиеся к колумбиту-танталиту, приведены в соответствие с новой рентгеновской установкой колумбита, принятой во всем мире (см. [8–10]).

В этой установке, при которой достигается структурное соответствие между установками ромбических кристаллов колумбита и иксиолита, с одной стороны, и однозначно определенной ориентировкой структурно близких, но моноклинных кристаллов вольфрамита [8] и воджинита [11] — с другой, сохранена ячейка Брейтгаупта (1858) — Штурдиванта (1930), но в иной ориентировке, отвечающей пространственной группе *Pbcn*. От установки Шрауфа-Гольдшмидта, наиболее распространенной в отечественной литературе, новая установка отличается поворотом на 90° вокруг оси *c*, от ранее принимавшейся установки Дэна (1892) — выбором (величиной) элементарной ячейки. По существу эта новая установка означает возврат к самой ранней, первоначальной морфологической установке кристаллов колумбита по Дэну (1837). Матрица перехода к ней от установки Шрауфа-Гольдшмидта имеет вид $010/100/001$, — т.е. в этих установках взаимно перемещены оси *a* и *b*. В качестве рентгеновской она получила название установки Штрунца-Теннисон (1966), поскольку указанные авторы, опираясь на анализ Ф. Лавеса и др. [8], ввели ее в очередном издании "Минералогических таблиц" (1966) и с тех пор воспроизводят во всех последующих переизданиях.

Кристаллы колумбита в карбонатитах всегда имеют пластинчатый или таблитчатый по (100) габитус и вытянуты по [001], причем размер их по длинной оси — обычно 0,1–0,3, реже до 0,5 мм, но иногда достигает 1–1,5 мм. Чаще чем кристаллические индивиды, встречаются сростки мелких пластинчатых кристаллов. Характерной чертой облика кристаллов колумбита в карбонатитах является сглаженность, закругленность вершин, ребер и граней; огранка кристаллов, особенно их головок, усложнена возникновением многочисленных мелких, неравномерно развитых второстепенных граней, притупляющих ребра между основными габитусными гранями. Эти второстепенные простые формы обычно неполногранны и, по наблюдениям В.Н. Квасницы и В.М. Крочука [7], принадлежат поясам [001], [011], [010], [012]. Указанные морфологические особенности кристаллов колумбита следует интерпретировать как признаки их позднейшего растворения.

Кристаллическая структура колумбитов из карбонатитов, по имеющимся данным, обычно характеризуется частичным разупорядочением, что вполне согласуется со специфическими условиями их формирования (малая глубинность, значительные температурные градиенты).

Наконец, на заключительном этапе формирования карбонатитовых месторождений, когда, в частности, отмечается повышение активности в растворах фтора, стронция, бария, редких земель, вновь спорадически появляется пироклор, в виде мелких правильных кубооктаэдрических или даже кубических кристаллов, обычно почти прозрачных, нарастающих на стенки пустот (полостей выщелачивания) в кавернозных анкеритовых карбонатитах. Эта поздняя генерация пироклора имеет существенно ниобиевый состав и резко обогащена барием и (или) стронцием, т.е. представлена (в разных массивах) панданитом, Sr-панданитом или Sr-пироклором; ее появление отражает сочетание высокой активности фтора с волнообразным повышением активности минералобразующих растворов на посткарбонатитовом этапе [5], весьма рельефно подчеркнутым, в частности, ростом активности стронция и бария. Именно к посткарбонатитовому этапу следует относить те явления растворения колумбита, которые явственно фиксируются в их внешнем облике и были отмечены выше.

Сопоставление кристалломорфологических особенностей последовательно возникающих генераций пироклора в карбонатитах позволяет говорить о существовании определенной направленности в появлении габитусных простых форм на кристаллах пироклора и, соответственно, о закономерной эволюции облика последних в ходе карбонатитового процесса: от октаэдрического через кубооктаэдрический к кубическому, по мере снижения температуры (от ранних стадий к поздним). Эта последовательность развития граней на кристаллах пироклора, отвечающая ряду $\{111\} \rightarrow \{110\} \rightarrow \{100\}$, была впервые подмечена Н.З. Евзиковой [4].

Если не считать возникновения (в качестве минералогических раритетов) бариевых и стронциевых пироклоров на завершающих стадиях формирования карбонатитовых месторождений, общая тенденция эволюции танталониобатов на протяжении всего собственно карбонатитового процесса, т.е. на фоне направленного уменьшения основности минералообразующей среды [5], в кристаллографическом аспекте проявлена в смене кубических минералов ромбическими. Иначе говоря, снижению температуры минералообразования в карбонатитовом процессе отвечает снижение симметрии возникающих минеральных фаз танталониобатов¹. С геохимических и кристаллохимических позиций указанная закономерность находит объяснение в параллельном уменьшении основности среды [5], с соответствующим падением активности кальция (как наиболее сильного основания, доминирующего в карбонатитовом процессе) и повышением активности железа, — что реализуется сначала в постепенном снижении роли крупных катионов в решетке танталониобатов (переход от пироклора $A_2B_2X_7$ к ферсмиту AB_2O_6), а затем — в замене их более мелкими — Fe^{2+} (смена ферсмита колумбитом). Это, естественно, приводит к уменьшению координационного числа катионов группы А и формы их координационных полиэдров (куб — "закрученный" куб — искаженный октаэдр), а тем самым — к перестройке всего структурного мотива (от субкаркасного к субслоистому типу), сопровождающейся снижением общей симметрии решетки.

Пегматиты

В редкометальных (литиевых) пегматитах, в отличие от карбонатитов, состав минералов группы колумбита-танталита меняется в широком диапазоне содержаний основных компонентов — от собственно колумбитов, содержащих не более 10% Ta_2O_5 при $FeO/MnO \geq 1$, до танталитов и манганотанталитов; наоборот, минералы структурного типа пироклора представлены в основном существенно танталовыми

¹ Ферсмит и колумбиту формально приписывается одна и та же пространственная группа D_{2d}^{14} — $Pbcn$ (или $Pnca$, $Pcan$ — в зависимости от принятой установки); но действительная симметрия ячейки колумбитов, по-видимому, в ряде случаев ниже, особенно у частично разупорядоченных разновидностей, поскольку в данном случае статистическое распределение Fe и Nb по октаэдрическим признакам вызывает, из-за большой разницы в размерах этих ионов, сильное дополнительное искажение координационных октаэдров и общую деформацию решетки, тем самым снижая ее симметрию [12], с. 148–149.

членами — микролитами и джалмаитами (уранмикролитами), в составе которых содержание тантала колеблется в узких границах.

Картина взаимоотношений минералов обеих названных групп в пегматитах несколько затушевывается двумя осложняющими факторами: многообразием минеральных форм тантала в пегматитах (к ниобию это относится в меньшей степени) и "вмешательством" олова — характерного элемента редкометалльных пегматитов, при определенных условиях начинающего играть важную роль в кристаллохимии танталовых минералов (появление оловотанталатов типа иксиолита и воджинита, и иногда также других олово-танталовых минералов — например, торолита). Кроме того, необходимо отметить варьирующую степень упорядоченности минералов структурно-го типа колумбита в пегматитах, где наряду с достаточно упорядоченными колумбит-танталитами и танталитами появляются их в различной степени разупорядоченные разновидности, вплоть до "псевдоиксиолитов" [13] — полностью неупорядоченных минералов с иксиолитовой структурой (при отсутствии в их составе олова). В пегматитах известны также моноклинный танталит со структурой воджинита (но с Fe^{3+} вместо Sn) и тапиолит или старингит (оловотапиолит).

Рассмотрим поэтому вначале более простой случай, когда олово в пегматитах либо отсутствует, либо (чаще) практически целиком сосредоточено в касситерите, а олово-танталаты не образуются. Такие условия обычны для полей редкометалльных пегматитов, формирующихся на относительно больших глубинах; типоморфным минералом литиевых пегматитов в подобных полях является первичный сподумен. Развитие пегматитового процесса в этих полях маркируется появлением следующих главных минеральных типов пегматитов (нередко участвующих в единой пространственной зональности пегматитового поля, в направлении от его лежачего бока к висячему):

колумбит-берилловые пегматиты — сподуменовые пегматиты — сподумен-берилл-танталитовые пегматиты — лепидолит-микролитовые пегматиты.

Слева направо в этом ряду растет интенсивность проявления поздних стадий пегматитового процесса, выраженных в развитии аутометасоматической альбитизации, грейзенизации, лепидолитизации.

Минералы тантала и ниобия в таких пегматитовых полях представлены главным образом группой колумбита-танталита; лишь на поздних стадиях пегматитового процесса появляются микролит и — обычно в весьма ограниченных количествах — более редкие танталовые минералы: симпсонит, стибियो- и бисмутотанталит и др.

Особенности эволюции минералов группы колумбит-танталита в пегматитовом процессе и их взаимоотношения между собой и с микролитом были в свое время детально разобраны, применительно к рассматриваемому более простому случаю, А.И. Гинзбургом [14]². В основных чертах они сводятся к следующему.

В минералах группы колумбита-танталита в ходе пегматитового процесса повышается величина Ta/Nb — и Mn/Fe -отношений: состав этих минералов меняется от собственно колумбитов с 10–20% (иногда до 30%) Ta_2O_5 , при $Mn/Fe \leq 1$ (блоковые колумбит-берилловые пегматиты, ранние стадии формирования сподуменовых пегматитов) через колумбит-танталиты с 40–50% Ta_2O_5 и $Mn/Fe \sim 1$ (сподуменовые пегматиты и ранние стадии формирования сподумен-берилл-танталитовых пегматитов), ниоботанталиты и танталиты с содержанием Ta_2O_5 от 50–60 до 75–78% и $Mn/Fe > 1$ (сподумен-берилл-танталитовые пегматиты) к практически безжелезистым красно-коричневым полупрозрачным манганотанталитам (альваролитам), содержащим 80–85% Ta_2O_5 (лепидолит-микролитовые пегматиты, включая соответствующие им по составу участки тел сподумен-берилл-танталитовых пегматитов).

От этой основной схемы иногда (при весьма высоких концентрациях тантала) наблюдаются некоторые частные отклонения: например, наряду с колумбит-танталитами и танталитами возникает тапиолит ([15], с. 39–41), причем, как правило, желе-

² Обобщенная схема эволюции тантало-ниобатов в пегматитовом процессе дана А.И. Гинзбургом в [12], с. 47–49 и вклейка.

зистый ($Mn\ O/FeO \approx 1 : 5-1 : 6$); параллельно с манганотанталитами появляются симпсонит, бисмутотанталит и др.

Колумбиты колумбит-берилловых пегматитов представлены толстотаблитчатыми по (100) и удлиненными по [001] кристаллами с наиболее развитыми формами: a (100), e (010), c (001), а также m (110), n (310), e (021) или u (111), иногда o (311) и k (101); характерны двойники по e (021). Колумбиты и колумбит-танталиты сподуменовых пегматитов, отчасти ниоботанталиты сподумен-берилл-танталитовых пегматитов образуют весьма тонкопластинчатые по (100) кристаллы ("листоватые" колумбиты А.И. Гинзбурга) с габитусными гранями a (100), e (021), u (111), o (311), g (310), реже c (001); также отмечаются двойники по (021). Для колумбит-танталитов и ниоботанталитов сподумен-берилл-танталитовых пегматитов более характерен изометричный и короткопризматический по [001] габитус с основными формами c (001) или (реже) f (302), a (100), b (010), m (110), g (310), для "копьевидных" (по А.И. Гинзбургу) танталитов, встречающихся в тех же пегматитах, — бипирамидальный облик с преобладающими гранями u (111), отчасти s (221), o (311) или n (121). Наконец, манганотанталиты образуют преимущественно выделения неправильной формы, но в целом уплощенно-призматического габитуса.

Наблюдается прямое соответствие между поперечными размерами пластинок "листоватых" колумбитов (колумбит-танталитов) и вмещающего их альбита: наиболее крупные кристаллы приурочены к клевеландиту, самые мелкие — к сахаровидному альбиту, при этом в агрегатах клевеландита, сложенных, как известно, розетками пластинчатых кристаллов альбита, "листоватый" колумбит также склонен к образованию радиально-лучистых сростков резко вытянутых по 001 и узких по 010 пластинчатых индивидов типа "колумбитовых солнц"; подобные же сростания отмечаются и для узкопластинчатых кристаллов колумбит-танталита. Размеры выделений колумбит-танталита, как и большинства других минералов пегматитов, в целом возрастают к центру жил, где сростки его изометричных кристаллов часто приобретают неправильную форму при весьма внушительных размерах: их масса достигает нескольких килограммов и даже десятков, а в отдельных случаях — первых сотен килограммов. Выделения манганотанталита тоже нередко бывают довольно крупными.

Таблитчатые кристаллы колумбита обычно имеют размеры по [011] 3–4 см, по [010] 3–5 мм, иногда до 10 × (1–2) см. Кристаллы "листоватых" колумбитов гораздо мельче, особенно в агрегатах сахаровидного альбита: до 2–5 мм по [001], в среднепластинчатом альбите они имеют длину до 5–10 мм, а в клевеландите — 5–8, реже до 10 см (при толщине по [100] не свыше 1 мм). Зерна "копьевидного" танталита обычно не крупнее 3–5 мм.

Состав минералов группы колумбита — танталита, как правило, закономерно меняется в пределах индивидуальных пегматитовых тел — от их периферии к центру, причем диапазон этого изменения определяется минеральным типом пегматита. Так, в колумбит-берилловых пегматитах кристаллы колумбита вообще появляются преимущественно во внутренних блоковых зонах, а в краевых зонах встречаются редко; общий интервал изменения содержания в них Ta_2O_5 от 10% до 20%, реже до 25–30%. В сподуменовых пегматитах к внешним частям жил тяготеют собственно колумбиты с содержанием Ta_2O_5 15–20% (реже до 30%), к внутренним — колумбит-танталиты, содержащие 35–45% Ta_2O_5 . Наконец, в сподумент-берилл-танталитовых пегматитах аналогичным образом распределяются колумбит-танталиты с 40–45% Ta_2O_5 , ниоботанталиты с 50–55% Ta_2O_5 и танталиты с 70–75% Ta_2O_5 (в "копьевидных" танталитах содержание Ta_2O_5 составляет 75–78%). Манганотанталиты появляются обычно в раздувах мощных тел этого типа.

Указанные вариации состава колумбитов-танталитов коррелируются с распределением в пегматитах продуктов их автометасоматического изменения. Так, в почти не альбитизированных колумбит-берилловых пегматитах присутствуют только толстотаблитчатые кристаллы бедного танталом железистого колумбита ($Ta_2O_5/Nb_2O_5 \approx 1 : 6-1 : 2$, редко до 1 : 1,5; $MnO/FeO \approx 1 : 2-1 : 2,5$), образование которого свя-

зывается с развитием кварц-мусковитового замещающего комплекса. С процессами альбитизации пегматитов связано образование тонкопластинчатых танталоколумбитов с танталониобиевым отношением 1:2–1:1,5, в которых содержание Ta_2O_5 возрастает до 25–30%, и колумбит-танталитов с Ta/Nb и $Mn/Fe \approx 1$, содержащих до 40–45% Ta_2O_5 (сподуменовые пегматиты). Ниоботанталиты (до 55% Ta_2O_5) и танталиты (до 75–78% Ta_2O_5), при $Mn/Fe \approx 1$, характерные для сподумен-берилл-танталитовых пегматитов, кристаллизуются в основном на протяжении стадии грейзенизации; в частности, "копьевидные" танталиты тесно ассоциируют с так называемым "альбит-грейзенами" А.И. Гинзбурга, представленными мелкозернистым кварц-альбит-мусковитовым агрегатом. К аналогичным образованиям тяготеет и тапиолит (когда он вообще присутствует в пегматитах). Манганотанталиты, появлением которых завершается эволюция минералов группы колумбита-танталита в пегматитовом процессе, формируются в начале стадии лепидолитизации. Соответственно, танталиты и манганотанталиты, как правило, тяготеют к грейзенизированным и лепидолитизированным участкам во внутренних частях пегматитовых тел, часто располагающимися под кварцевыми ядрами (особенно в раздувах жил).

А.И. Гинзбург [14] подчеркивает гетерогенный характер внутреннего строения выделений некоторых минералов группы колумбита-танталита в редкометалльных пегматитах. Следует, однако, заметить, что прямые определения содержания тантала в различных компонентах подобных неоднородных выделений отсутствуют, а наблюдаемые существенные различия в их поведении по отношению к HF могут объясняться не только разным составом, но разной степенью упорядоченности, поскольку ныне установлено иными методами (В.Л. Лаврова, Н.В. Петрова и др., 1983г.), что скорость растворения в кислотах неупорядоченных разновидностей минералов структурного типа колумбита в 8–10 раз выше, чем упорядоченных (при постоянном или близком составе).

Анализ имеющихся в настоящее время рентгенометрических данных [12] свидетельствует о том, что в рассматриваемом более простом случае полей литиевых пегматитов со сподуменом неупорядоченные разности колумбитов и танталитов не пользуются столь широким распространением, как в следующем случае (см. ниже). Тем не менее, частично неупорядоченные минералы в этих пегматитах развиты, что особенно относится к более ранним колумбитам и колумбит-танталитам (вплоть до ниоботанталитов), в меньшей степени — к собственно танталитам (с содержанием 66–67% Ta_2O_5). Поздние "копьевидные" танталиты и манганотанталиты в таких пегматитах, по-видимому, обычно характеризуется высокой степенью упорядочения. Таким образом, в ходе пегматитового процесса степень упорядоченности минералов структурного типа колумбита возрастает, а следовательно — повышается и реальная симметрия их решетки.

В самом конце пегматитового процесса, а точнее — на стадии интенсивного развития лепидолитизации, в пегматитах появляется микролит, при этом иногда в столь больших количествах, что становится объектом добычи. Микролит способен развиваться по всем более ранним танталовым минералам пегматитов, с которыми он пространственно ассоциирует, т.е. по танталиту, манганотанталиту, симпсониту, стибитотанталиту и др. Микролиты в пегматитах характеризуются большим разнообразием окрасок (обычно светлых: желтых, зеленоватых, розоватых и др., до бесцветных) и заметными (по содержанию элементов-примесей) вариациями состава, отражающего состав тех минералов, по которым микролит развивался (отсюда — появление в составе микролитов повышенных содержаний алюминия, сурьмы, висмута, титана, ниобия, редких земель, бария и др.).

Наиболее широко распространен процесс микролитизации манганотанталитов и танталитов. Наблюдаются типичные кокардовые структуры обрастания зерен этих минералов тонкокристаллическим агрегатом микролита, который проникает также по трещинкам внутрь выделений танталита (манганотанталита) и замещает их с образованием частичных, а подчас и полных псевдоморфоз. Известны, например,

псевдоморфозы микролита по стибитотанталиту, в свою очередь, развившемуся по манганотанталиту.

Наряду с псевдоморфозами и тонкозернистыми агрегатами, "привязанными" к кристаллам манганотанталита и танталита, микролит образует и самостоятельные мелкие кристаллы октаэдрического или кубооктаэдрического габитуса. В некоторых месторождениях — как правило, там, где танталит и особенно манганотанталит отсутствуют, микролит встречается преимущественно в виде кристаллов, образующих вкрашенность в агрегатах породообразующих минералов — клевеландите, лепидолите. В таких случаях иногда возникают две генерации микролита, более ранняя из которых (тяготеющая к клевеландиту) бывает обогащена ураном (вплоть до образования джалмаита), а более поздняя (ассоциирующая с лепидолитом) — представлена собственно микролитом. Характерный пример описан В.А. Корнетовой [16].

Джалмаиты (содержание иногда до 15% $UO_2 + UO_3$) отличаются темно-бурой окраской и обычно метамиктны. По наблюдениям В.А. Корнетовой [16], их кристаллы богаты формами: помимо габитусных граней октаэдра (111), на них бывают развиты грани куба (100), ромбододекаэдра (110) и тригонтриоктаэдра (113). Такая огранка характеризует кристаллы темной разновидности урансодержащего микролита I, возникающей вначале; в ходе кристаллизации микролит светлеет (из бурого становится желтым), и облик его кристаллов несколько меняется, представляя собой комбинацию доминирующего октаэдра с узким поясом (110). Встречаются и зональные кристаллы микролита I, темные во внутренних частях и более светлые во внешних, форма которых соответственно изменилась в процессе роста (наружная огранка проще огранки темных фантомов).

Светлоокрашенные кристаллы микролита II имеют простую форму правильных октаэдров.

Содержание Nb_2O_5 10–11% является для микролитов из пегматитов максимальным; как правило, в них присутствует не более 5–6%, а чаще 0,5–2% Nb_2O_5 , тогда как содержание Ta_2O_5 достигает нередко 75–80%. Микролит — самый богатый танталом из обычных танталовых минералов пегматитов; даже микролитовые концентраты (получаемые, например, из пегматитов Алту-Лигонья, Мозамбик) содержат до 70% Ta_2O_5 . Образование микролита знаменует собой завершение геохимической тенденции к накоплению тантала и повышению Ta/Nb — отношения (а также к понижению роли железа), прослеживаемой на всем протяжении пегматитового процесса.

В некоторых случаях наиболее поздняя генерация микролита в пегматитах бывает представлена рейкебурином, содержащим около 5% BaO .

Микролит тесно ассоциирует с фторсодержащими минералами — лепидолитом, амблигонитом, апатитом; он образуется в условиях, когда повышение активности фтора совпадает с некоторым повышением щелочности среды — на спаде волны кислотности, выраженном в формировании лепидотового замещающего комплекса, непосредственно вслед за стадией грейзенизации (отвечающей максимуму этой волны). Такая обстановка благоприятствует кристаллизации минералов, которые сочетают в своем составе фтор и катион, являющийся сильным основанием, — в частности, кальций (апатит, микролит) или даже барий (рейкебурит).

Таким образом, в ходе пегматитового процесса (в рассматриваемом более простом варианте) эволюция минералов структурных типов колумбита и пирохлора имеет в целом обратную направленность по сравнению с их эволюцией в карбонатитовом процессе:

а) в пегматитах эта эволюция протекает в направлении от колумбитов через колумбит-танталиты, ниоботанталиты и танталиты к манганотанталитам и микролитам, причем степень упорядоченности последовательно возникающих минералов группы колумбита-танталита имеет тенденцию к повышению; в указанном ряду также прогрессивно возрастает содержание тантала в более поздних минералах и соответственно величина Ta/Nb — отношения; параллельно уменьшается активность железа, а Mn/Fe — отношение при образовании манганотанталитов проходит через максимум;

б) минералы группы колумбита-танталита выделяются в основном в виде кристаллов, более или менее хорошо образованных, тогда как микролиты — минералы структурного типа пирохлора — в значительной мере в виде тонкокристаллических агрегатов и псевдоморфоз по танталиту (манганотанталиту, стибиотанталиту и др.);

в) симметрия возникающих минералов (с учетом различий в степени упорядоченности колумбитов-танталитов) в целом возрастает в ходе пегматитового процесса; частично разупорядоченные колумбиты и колумбит-танталиты с пониженной ромбической симметрией ячейки сменяются более высокосимметричными упорядоченными танталитами и манганотанталитами, а затем кубическими микролитами; появление в качестве промежуточных фаз тригонального симпсонита или ромбических стибио- и бисмутотанталита, иногда также тетрагонального тапиолита лишь подчеркивает эту тенденцию (ср. с появлением ферсмита в карбонатитах);

г) морфология кристаллов микролита от ранней генерации к поздней упрощается; дополнительные простые формы (113), (100), (110) исчезают в указанной последовательности, и кристаллы приобретают форму правильных октаэдров (111).

Несколько более сложная картина наблюдается в полях редкометальных пегматитов меньшей глубинности, когда характеристическим минералом литиевых пегматитов становится петалит (нередко появляется также эвкрипит), а основная масса присутствующего в них сподумена представляет собой продукт распада петалита с образованием агрегата сподумена и кварца.

Для таких полей (обычно представленных сериями этажно расположенных полого-залегающих тел) характерна вертикальная зональность в распределении минеральных типов пегматитов, часто комбинирующая с горизонтальной зональностью. В этой зональности, по сравнению с рассмотренным выше случаем, место сподуменовых пегматитов занимают петалитовые: а место сподумен-берилл-танталитовых пегматитов — петалит-танталит-воджинитовые.

Концентрации тантала в подобных пегматитовых полях, как правило, более высокие, чем в полях сподуменового типа, рассмотренных ранее. Это обстоятельство проявляется уже на ранних стадиях пегматитового процесса: типичные колумбиты для таких полей не характерны, и эволюция минералов структурного типа колумбита начинается по существу сразу с колумбит-танталитов, содержащих 30–40% Ta_2O_5 при $Mn/Fe \approx 1$.

Весь дальнейший ход эволюции протекает при низкой активности железа, так что среди танталитов в этих пегматитах преобладают существенно марганцовистые разновидности. Кроме того, в полях рассматриваемого типа весьма широкое развитие получают неупорядоченные (частично или полностью) разновидности колумбит-танталитов и танталитов, вплоть до полностью разупорядоченных колумбит-танталитов с иксиолитовой структурой (так называемые псевдоиксиолиты — см. [13, 17, 18]). Так, например, оценка степени упорядоченности минералов группы колумбита-танталита (включая иксиолит и псевдоиксиолит) в одном из пегматитовых месторождений Восточной Сибири по рентгенометрической методике А.И. Комкова [19] показала колебания значений S от 0,0–0,2 (иксиолиты, псевдоиксиолиты) до 0,9–1,0 (упорядоченные танталиты), безотносительно к содержанию олова и железа (как правило, при низкой железистости); преобладают значения S 0,5–0,7. Широкое распространение разностей колумбит-танталитов со значительным разупорядочением ионов железа устанавливается также с помощью мессбауэровской (ЯГР) спектроскопии, а вариации степени упорядоченности катионов в слое колумбитовой структуры — методом ИКС.

Далее, в силу того, что такие поля формируются при более высокой фугитивности кислорода, марганец и тем более железо в присутствующих в подобных пегматитах танталитах нередко претерпевают частичное окисление до трехвалентного состояния, что в свою очередь приводит к появлению в этих пегматитах моноклинных танталитов со структурой воджинитового типа.

Наконец, наиболее, пожалуй, яркой отличительной чертой подобных пегматитов является широкое развитие в них наряду с касситеритом оловотанталатов — иксиолита и особенно воджинита [11, 20, и др.]. В некоторых месторождениях оловотанталаты

приобретают значение главных компонентов танталовых руд (воджинитовые концентраты месторождения Берник-Лейк, провинция Манитоба, Канада), но чаще они входят в состав танталовых руд и концентратов наряду с танталитом и микролитом. В подобных пегматитах возникают и другие олово-танталовые минералы, например, торолит, старингит.

Поздние стадии пегматитового процесса при формировании петалитовых и петалит-воджинитовых пегматитов протекают в условиях весьма высокой активности фтора; наряду с лепидолитом для них очень характерен топаз. Естественно, что эволюция танталовых минералов и здесь завершается образованием микролита, который, однако, развивается не только по танталиту или псевдоиксиолиту, но в значительной мере также по олово-танталовым минералам: иксиолиту, воджиниту, торолиту; это, конечно, вызывает некоторые особенности состава таких микролитов (прежде всего, появление в них олова).

Возникновение олово-танталатов, как и разупорядоченных форм танталитов, в таких пегматитах, очевидно, определяется специфическими геологическими условиями формирования подобных полей (малая глубина, высокие температурные градиенты, большие скорости остывания и т.д.).

Оловотанталаты возникают частью еще на стадии альбитизации (иксиолит), частью на стадии грейзенизации (воджинит, постоянно и тесно ассоциирующий с агрегатом мелкочешуйчатой зеленой слюдки — рубидиевого или литиево-рубидиевого мусковита). На стадии лепидолитизации по этим минералам образуется моноклинный танталат олова торолит SnTa_2O_6 , а затем перечисленные минералы частично замещаются микролитом (с выделением касситерита). Поэтому в агрегатах лепидолита указанные минералы могут присутствовать лишь в качестве реликтов, а преобладающее развитие приобретают микролит и касситерит. Микролит наблюдается в виде самостоятельных мелких светлокрасных (в разные бледные тона, вплоть до бесцветных, но чаще желтые) правильных октаэдрических кристаллов, а также в виде губчатых псевдоморфоз по более ранним танталовым минералам.

Количественные соотношения обеих форм развития варьируют в различных месторождениях и даже в различных участках одного пегматитового тела. В отдельных случаях появляется более ранняя генерация микролита, представленная темнокрасненными кристаллами его урансодержащей разновидности (вплоть до джалмаита — см. [21]).

Устанавливается [17, 18, 22–25], что микролитизации особенно подвержены частично или полностью разупорядоченные разновидности танталита-псевдоиксиолит и разупорядоченный манганотанталит, тогда как упорядоченные танталиты замещаются микролитом в значительно меньшей степени; по всей видимости, это обусловлено резким различием в растворимости упорядоченных и неупорядоченных модификаций танталита (см. выше). Вместе с тем, микролит весьма "охотно" развивается по олово-танталовым минералам, не отдавая особого предпочтения ни одному из них. Он одинаково легко замещает и полностью разупорядоченный ромбический иксиолит $(\text{Ta, Nb, Sn, Fe, Mn})_4\text{O}_8$, и моноклинный воджинит, представляющий собой упорядоченную форму иксиолитового структурного типа¹ (на практике больше приходится сталкиваться с развитием микролита по воджиниту, поскольку эти два минерала чаще ассоциируют между собой); в обоих случаях микролитизация, как уже упоминалось, сопровождается образованием касситерита. Последнее обстоятельство обнаруживает причину той легкости, с которой оловотанталаты (включая столь труднорастворимый кислотами минерал как воджинит) подвергаются микролитизации: дело здесь не в большей или меньшей растворимости минералов, а в том, что оловотанталаты оказываются устойчивыми

¹ Пространственная группа воджинита определена пока не вполне точно: более вероятно центричная группа $C_{2h}^2 - C2/c$, при которой в решетке возможны лишь три неэквивалентные катионные позиции, и формула минерала имеет вид: $\text{Mn}(\text{Sn, Ta, Ti, Fe})(\text{Ta, Nb})_2\text{O}_8$ [9]; однако при ацентричной пространственной группе $C_s^4 - Cc$ возможны 4 катионных позиций, т.е. формула приобретает вид: $\text{Mn}(\text{Sn, Ta, Ti, Fe})(\text{Ta, Nb})\text{TaO}_8$ [25].

лишь в узком диапазоне физико-химических условий, на коротком отрезке пегматитового процесса, завершающемся стадией грейзенизации; когда в конце процесса, на спаде полны кислотности, повышается активность фтора, оловотанталаты становятся неустойчивыми и распадаются с выделением олова в форме касситерита, а тантал в этой обстановке, естественно, образует микролит.

Даже в тех участках пегматитовых тел, где микролит присутствует преимущественно в виде кристаллов и на первый взгляд производит впечатление самостоятельного образования, более детальные исследования по особенностям его состава, присутствию мелких реликтовых включений и т.п. признакам выявляют возможность возникновения этих кристаллов за счет воджинита или богатого танталом псевдоиксиолита, иногда также торолита.

С помощью электронной микроскопии удалось недавно проследить самые начальные стадии развития микролита по воджиниту на примере одного из месторождений восточной Сибири; на снимках отчетливо фиксируются развивающиеся по воджиниту мельчайшие глобулярные образования, идентифицированные как микролит посредством микродифракции; в дальнейшем ходе процесса эти глобулы постепенно трансформируются в столь же мелкие, но уже вполне индивидуализированные правильные октаэдрические кристаллики (Л.Л. Розовская, 1980 г.).

Воджинит — весьма богатый танталом минерал; в нем содержится 70–75% Ta_2O_5 . Примерно такого же уровня достигает содержание Ta_2O_5 в высокотанталовых разновидностях торолитов, нередко развивающихся по воджинитам. Тем не менее микролиты, замещающие эти минералы, еще богаче танталом и содержат до 80% Ta_2O_5 .

У оловотанталатов (или при вхождении в решетку танталата окисного железа) процессы упорядочения приводят к снижению симметрии до моноклинной.

Соответственно появление оловотанталатов в петалитовых пегматитах вызывает заметное "нарушение" в общем ходе эволюции минералов группы колумбита-танталита: по мере развития пегматитового процесса здесь ромбические минералы (часто разупорядоченные, т.е. с пониженной ромбической симметрией) сначала сменяются моноклинными (воджинитом, торолитом) или сосуществуют с ними, а уж затем появляется кубический микролит. Новоджинит и иксиолит представляют особый структурный тип (хотя и родственной колумбитовому); в еще большей степени это относится к торолиту. Если же ограничиться рассмотрением эволюции собственно колумбит-танталитов, то и в данном, несомненно более сложном случае отмеченные выше общие тенденции сохраняют свое значение.

С кристаллохимических позиций в какой-то мере "перекликается" образование воджинита в пегматитах и минералов структурного типа циркелита (в частности, ниобиевого циркелита) в карбонатитах. И воджинит, и циркелит принадлежат к одной и той же пространственной группе моноклинной сингонии ($C2/c$ или Cc), вследствие чего они как бы "выпадают" из общего эволюционного ряда; циркелиты тесно ассоциируют с кубическим пироксеном (гачеттолитом) и сами приобретают внешнюю (морфологическую) псевдотригональную симметрию, которую стремятся еще повысить до псевдокубической в характерных для них сложных двойниковых сростках. По-видимому, кристаллохимическая функция Sn^{4+} в оловотанталатах сопоставима с ролью Zn^{4+} в ниобоцирконатах; вхождение обоих ионов в состав титанотанталониобатов служит той причиной, которая ведет к увеличению числа структурно неэквивалентных катионных позиций в решетке минералов, а следовательно, к снижению симметрии их ячейки, — чем и вызываются в обоих случаях однотипные отклонения от ведущих тенденций изменения симметрии минералов ниобия и тантала в ходе карбонатитового и пегматитового процессов.

Петалитовые пегматиты иногда появляются в пределах полей сподуменовых пегматитов, — по-видимому, в тех случаях, когда на отдельных участках поля пегматиты, в силу причин геологоструктурного характера, смогли проникнуть на более высокий гипсометрический уровень в земной коре, либо же вследствие каких-то особых обстоятельств значительно упало внутреннее давление в пегматитовых камерах.

Но каковы бы ни были причины возникновения петалитовых пегматитов в полях сподуменовых пегматитов, в рамках настоящей работы интересно обратить внимание на тот замечательный факт, что стоит появиться в подобных полях петалитовым пегматитам, как в них немедленно обнаруживаются и разупорядоченные танталиты, и оловотанталаты (включая воджинит [27]), а зачастую и горолит, — т.е. весь ход минералообразования в пегматитовом процессе следует схеме в второго из рассмотренных выше вариантов.

Выводы. 1. Геохимическая направленность эволюции минералов структурных типов пирохлора и колумбита в редкометальных карбонатитах и пегматитах во многом противоположна:

а) карбонатитовый процесс характеризуется тенденцией к последовательному возникновению минералов, все более обогащенных ниобием и более бедных танталом; в пегматитовом процессе имеет место обратная тенденция прогрессивного обогащения танталом поздних минералов (как правило, с соответствующим уменьшением величины Nb/Ta — отношения);

б) минералообразование в карбонатитах протекает при низкой активности марганца (что отражается на составе карбонатитовых колумбитов), тогда как в пегматитах, вплоть до самых поздних стадий их формирования, активность марганца возрастает, и соответственно убывает Fe/Mn-отношение (приближающееся в манганотанталитах и марганцовистых воджинитах к нулевому значению);

в) в карбонатитах, особенно на ранних стадиях, отмечается высокая активность титана и циркония, что проявляется в широком развитии титано- и ниоботитаноцирконатов типа циркелита; в пегматитах, особенно на поздних стадиях, наблюдается высокая активность олова, что при определенных условиях может приводить к образованию оловотанталатов типа воджинита;

г) в редкометальных пегматитах, по сравнению с карбонатитами, весьма низка активность кальция и редких земель (особенно цериевых), что также отражается на составе минералов ниобия и тантала, возникающих в обоих случаях.

2. В результате этого минералы групп пирохлора и колумбита в карбонатитах и пегматитах возникают в целом в обратной последовательности: на протяжении карбонатитового процесса среди ниобиевых (и танталсодержащих) минералов резко доминирует пирохлор (на ранних стадиях — гатчеттолит), а колумбит появляется лишь к концу процесса; наоборот, в пегматитах вплоть до самых поздних стадий преобладают минералы ряды колумбита-танталита, и микролит — минерал структурного типа пирохлора — возникает лишь к концу процесса. При этом минералы обеих групп — колумбита и пирохлора — в пегматитах значительно богаче танталом, чем в карбонатитах; колумбиты из карбонатитов всегда представлены существенно ниобиевыми разностями, а минералы группы пирохлора в пегматитах — существенно танталовыми членами типа микролита. Появление поздних Ba- и Sr-пирохлоров на посткарбонатитовом этапе, однако в какой-то мере параллелизуется с возникновением микролита (и особенно рейкебурита) на завершающей стадии пегматитового процесса.

3. В соответствии с иной последовательностью образования разнятся и формы выделения минералов; так, в карбонатитах колумбитам, развивающимся в основном по более ранним пирохлорам и гатчеттолитам, присущи формы выделения (губчатые псевдоморфозы), близкие известным в пегматитах формам развития микролитов (замещающих танталиты, манганотанталиты, иксиолиты, воджиниты и другие более ранние танталовые минералы).

Любопытно, что габитус кристаллов пирохлора в карбонатитах эволюционирует в направлении, обратном изменению габитуса последовательных генераций микролита в пегматитах; при этом простые формы на кристаллах пирохлора в карбонатитах появляются в последовательности, в целом обратной порядку исчезновения соответствующих граней на кристаллах микролита в пегматитах.

4. Кристаллографический аспект эволюции минералов ниобия и тантала в карбонатитах и пегматитах также характеризуется в целом проявлением противоположных тен-

денций: если в карбонатах титанотанталониобаты эволюционируют в направлении понижения симметрии кристаллов последовательно возникающих минералов по ряду пироклор → ферсмит → колумбит (с отклонением на ранних стадиях вследствие кристаллохимического "вмешательства" циркония), то в пегматитах ведущей тенденцией является повышение симметрии в ряду: преимущественно разупорядоченные колумбиты и колумбит-танталиты → преимущественно упорядоченные танталиты и манганотанталиты → микролиты (с отклонением на поздних стадиях в случае кристаллохимического "вмешательства" олова).

5. При всем том и в карбонатитовом, и в пегматитовом процессах образование поздних минеральных фаз ниобия (карбонатиты) и тантала (пегматиты) тесно "привязано" к ранее возникшим тантало-ниобиевым минералам. Это свидетельствует о большой инертности поведения ниобия (в меньшей мере тантала) в карбонатитовом процессе и тантала (в меньшей мере ниобия) — в пегматитовом. Взаимоотношения минералов структурных типов пироклора и колумбита в карбонатитовом и пегматитовом процессах однозначно свидетельствуют о том, что никакого дополнительного привноса ниобия (тантала) на поздних стадиях формирования карбонатитов (пегматитов) не происходит; все минералы ниобия (тантала) и их различные генерации, появляющиеся в ходе карбонатитового (пегматитового) процессов, формируются за счет материала ранее образованных минералов — либо путем непосредственного их замещения, либо в результате их растворения и переотложения. При этом величина Nb/Ta — отношения во вновь возникающих минеральных фазах, а тем самым и уровень концентрации ниобия (тантала) в карбонатах (пегматитах), регулируется изменением величин коэффициентов распределения Nb и Ta между порвыми растворами и твердой фазой в зависимости от эволюции физико-химических параметров системы (температуры, режима основности-кислотности, отчасти давления, а также валового катионно-анионного состава растворов, изменяющегося с понижением температуры в ходе реакций минералообразования).

Иными словами, поступление ниобия и тантала и в случае карбонатитов, и в случае пегматитов происходило одноактно, а дальнейшее поведение этих элементов, включая образование ими новых минеральных фаз, управляется закономерностями развития автономно эволюционирующих карбонатитовых или пегматитовых систем.

6. Эволюция минералов ниобия и тантала в карбонатах и пегматитах тесно увязывается с волнообразным изменением кислотно-основных свойств минералообразующей среды, обусловленным главным образом падением температуры в ходе карбонатитового и пегматитового процессов. Анализ взаимоотношений минералов структурных типов пироклора и колумбита в карбонатах и пегматитах дает основание считать, что поздние стадии карбонатитового процесса в известной мере сближаются по уровню кислотности минералообразующих растворов с ранними стадиями пегматитового процесса; это находит, в частности, свое выражение в преобладающем развитии колумбита в поздних карбонатах и ранних пегматитах. Дальнейший ход пегматитового процесса протекает в условиях нового волнообразного изменения режима кислотности растворов (повышающейся вплоть до стадии грейзенизации и несколько снижающейся на стадии лепидолитизации, одновременно с ростом активности фтора на этой стадии), — тогда как процесс формирования карбонатитов завершается "отраженным" повышением основности растворов на посткарбонатитовом этапе (тоже при параллельном росте активности фтора).

В результате возникает еще один, заключительный эпизод конвергентного сближения редкометальных карбонатитов и пегматитов, с образованием в первых поздних Ва-St-пироклора, во вторых — микролитов, вплоть до рейкебурита. Однако на протяжении большей части карбонатитового и пегматитового процесса условия минералообразования в них (в отношении кислотности-щелочности) существенно различны; именно вследствие этого в карбонатах преимущественное распространение получает пироклор, а в пегматитах — колумбит-танталит и танталит (к тому же марганцовистый).

7. Закономерное изменение симметрии танталониобатов, появляющихся в ходе карбонатитового и пегматитового процессов, дает основание поставить вопрос о роли симметрии минералообразующей среды в их возникновении. Обычно мы ищем влияние симметрии среды (определяемое известным принципом П. Кюри) на уже сформированных кристаллах, тогда как оно может проявляться — и важно научиться его распознавать — еще в ходе образования соответствующих соединений в растворах, т.е. на стадии зарождения кристаллических решеток будущих минералов. В этой связи существенным моментом является установление корреляций между химизмом среды (в частности, химической активностью тех или иных катионов) и геометрией возникающих в этой среде кристаллических структур (которая определяется координационным числом ведущих катионов, в свою очередь, зависящим от их размеров). В силу изложенного изменение химической активности элементов оказывает направленное влияние на геометрию и метрику возникающих соединений, т.е. химический и геохимический аспекты минералообразования оказываются неразрывно связанными между собой. В тексте данной статьи приведено несколько наглядных примеров того, как осуществляется это влияние в конкретных случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург А.И., Здорик Т.Б., Фельдман Л.Г. Редкометалльные карбонатиты и редкометалльные пегматиты. — Изв. вузов, Геология и разведка, 1978, № 4, с. 25–34.
2. Гинзбург А.И., Фельдман Л.Г. Месторождения тантала и ниобия. — В кн.: Рудные месторождения СССР. Т.3. М.: Недра, 1978, с. 292–342.
3. Гайдукова В.С., Здорик Т.Б. Минералы редких элементов в карбонатитах. — В кн.: Геологическое строение и минерало-геохимические особенности редкометалльных карбонатитов. (Геология месторождений редких элементов, вып. 17). М.: Госгеолтехиздат, 1962, с. 86–117.
4. Евзикова Н.З. Об ориентированном нарастании и изменении облика кристаллов пироклора. — Зап. Всес. мин. об-ва, 1960, ч. 89, вып. 5, с. 555–560.
5. О режиме кислотности-основности карбонатитового процесса. — В кн.: Геология месторождений редких элементов. Вып. 35. М.: Недра, 1975, с. 69–79; Авт.: Е.М. Эпштейн, Т.Б. Здорик, В.А. Жариков и др.
6. Типоморфные особенности колумбита из карбонатитов. — Минерал. сб. Львов. ун-та, 1977, № 31, вып. 1, с. 71–74. Авт.: Е.Я. Марченко, З.В. Бартошинский, Р.Г. Сизова и др.
7. Иванова А.В., Квасница В.Н., Крочук В.М. Особенности химизма и морфологии колумбита-танталита из минеральных комплексов Приазовья. — Минерал. журнал, 1980, т. 2, № 5, с. 54–63.
8. Laves F., Bayer G., Panagos A. Strukturelle Beziehungen zwischen den Typen α - PbO_2 , $FeWO_4$ (Wolframit) und $FeNb_2O_6$ (Coluobit) und über die Polymorphie des $FeNbO_4$. — Schweiz. mineral. petrogr. Mitt., 1963, Bd. 43, H. 1, S. 217–234.
9. Ferguson R.B., Hawthorne F.G., Grice J.D. The crystal structures of tantalite, ixiolite and wodginite from Bernic Lake, Manitoba. — Canad. mineral., 1976, vol. 14, pt. 4, 540–562.
10. Strunz F., Tennyson Ch. Mineralogische Tabellen. 7. Aufl. Leipzig, 1978, S. 204–211.
11. Nickel E.H., Rowland J.F., McAdam R.C. Wodginite — a new tin-manganese tantalate from Wodgina, Australia and Bernic Lake, Manitoba. — Canad. miner., 1963, vol. 7, pt. 1, p. 390–402.
12. Горжевская С.А., Сидоренко Г.А., Гинзбург А.И. Титанотанталониобаты. — М.: Недра, 1974, с. 344.
13. Nickel E.H., Rowland J.F., McAdam R.C. Ixiolite a columbite substructure. — Amer. miner., 1963, vol. 48, N 9–10, p. 961–979.
14. Гинзбург А.И. О некоторых особенностях геохимии тантала и типах танталового оруденения. — Геохимия, 1956, № 3, с. 74–83.
15. Розанов Н.И., Лавриненко Л.Ф. Редкометалльные пегматиты Украины. М.: Наука, 1979, с. 36–41.
16. Корнетова В.А., Казакова М.Е. Урансодержащий микролит-джалмаит в одном из пегматитовых месторождений Сибири. — В кн.: Минералы СССР (Тр. Минерал. музея АН СССР, вып. 15). М.: Изд-во АН СССР, 1964, с. 219–222.
17. Grice J.D., Černý P., Ferguson R.B. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. II. Wodginite, tantalite, pseudo-ixiolite and related minerals. — Canad. Miner., 1972, vol. 11, pt. 3, p. 609–642.
18. Černý P. Granite pegmatites and their minerals: selected examples of recent progress. — Fortschr. Minerl., 1975, spec. issue to vol. 52, S. 225–250.
19. Комков А.И. Количественные критерии оцен-

- ки степени упорядоченности колумбитовых и танталитовых структур. — В кн.: Кристаллохимия и структура минералов. Л.: Наука, Ленингр. отд-ние 1974, с. 75–82.
20. *Луговской Г.П., Сурков Б.К.* О воджините из пегматитов Сибири. — В кн.: Новое в минералогических исследованиях. М., 1976, с. 46–47.
 21. *Matyas В.В.* Джалмаит — урансодержащий микролит из натролитиевых пегматитов. — В кн.: Геология месторождений редких элементов. М.: Гостеолтехиздат, 1961, вып. 9, с. 53–61.
 22. *Cerny P., Turnock A.C.* Pegmatites of southeastern Manitoba. — Geol. Ass. Canada Spec. Paper, 1971, N 9, p. 119–127.
 23. *Cerny P., Turnock A.C.* Niobium-tantalum minerals from granitic pegmatites at Gree Lake, southeastern Manitoba. — Canad. mineral., 1971, vol. 10, pt. 5, p. 755–772.
 24. *Crouse R.A., Cerny P.* The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. I. Geology and paragenesis. — Canad. mineral., 1972, vol. 11, pt 3, p. 591–608.
 25. *Crouse R.A., Černý P.* The Tanco pegmatite, southeastern Manitoba. — CIM Bull., 1979, vol. 72, N 802, p. 142–150.
 26. *Graham J., Thornber M.R.* The crystal chemistry of complex niobium and tantalum oxides. II. Composition and structure of wodginite. — Amer. Mineral., 1974, vol. 59, N 9–10, p. 1040–1044.
 27. Первая находка воджинита в СССР. — Докл. АН СССР, 1966, т. 167, № 5, с. 1135–1138. Авт.: В.А. Хвостова, В.Н. Павлова, В.Б. Александров, Н.В. Максимова.