

# **ПРИРОДА**

№ 2, 2001 г.

**Шмакин Б.М.**

## **Экстремальное концентрирование элементов в гранитных пегматитах**

(с) “Природа”

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**

<http://vivovoco.nns.ru>

<http://vivovoco.rsl.ru>

<http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>

# Экстремальное концентрирование элементов в гранитных пегматитах

Б.М.Шмакин

Некоторое время назад я имел возможность привлечь внимание читателей «Природы» к уникальным горным породам — гранитным пегматитам [1]. В последние годы интерес промышленности к этим объектам несколько ослаб, главным образом из-за снижения спроса на листовую слюду — мусковит, использования альтернативных источников бериллия и лития, широкого применения синтетического пьезокварца. Однако гранитные пегматиты продолжают оставаться практически единственным источником тантала и цезия, из них по-прежнему добывают некоторое количество слюды, лития и бериллия, а главное — резко возрос спрос на драгоценные камни, которыми так богаты эти породы. Большой интерес для коллекционеров и минералогических музеев представляют замечательные по красоте друзы пегматитовых минералов и образцы редких минеральных видов, список которых непрерывно пополняется. Вот почему гранитные пегматиты постоянно остаются в поле зрения как научных работников и геологов-практиков, так и все возрастающей армии любителей камня. Продолжаются регулярные совещания и симпозиумы, посвященные минералогии и генезису пегматитов вообще или какой-либо

© Б.М.Шмакин



*Борис Матвеевич Шмакин, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института геохимии им.А.П.Виноградова СО РАН. Область научных интересов — минералогия и геохимия пегматитов, метасоматитов, гранитоидов. Заслуженный деятель науки РФ. Неоднократно публиковался в «Природе».*

конкретной их группы. И вопрос о причинах и способах концентрирования различных элементов в пегматитовых жилах оказывается одним из самых злободневных.

## Минералы редких земель в «пустых» пегматитах

Еще в начале нашего столетия Радиевая экспедиция Российской академии наук, организованная В.И.Вернадским, обратила внимание на гранитные пегматиты в бассейне р.Слюдянки возле южного окончания оз.Байкал. В них встречались крупные кристаллы редких минералов ниобатов и тантало-ниобатов ит-

трия и лантаноидов (фергусонит, эвксенит), ниобо-титаната кальция, натрия и урана (бетафит), силиката лантаноидов и иттрия (ортит или алланит), силиката тория и урана (торит), оксида урана (уранинит), которые наряду с редкоземельными элементами содержали торий и уран. Надо отметить, что на начальном этапе изучения радиоактивности крупные кристаллы уранинита и других урансодержащих минералов из гранитных пегматитов Канады и Фенноскандии привлекали особое внимание исследователей. Поэтому естественно, что пегматиты Слюдянки интенсивно изучались, здесь были проведены разведочные работы. Старые выработки — копи Якунина, Пилипенко, Ферсмана,

Вернадского — сохранились до сих пор, а пегматиты стали объектами исследований нескольких поколений отечественных минералогов.

В 40-х годах пегматиты, аналогичные по составу акцессорных (второстепенных) минералов, были обнаружены в Приольхонье — средней части северо-западного побережья Байкала. Здесь выделяются три пегматитовых поля, несколько различающихся по морфологии и составу жил: Аинское — в пределах одноименного гранитного массива, Тажеранское — с вмещающими нефелиновыми сиенитами, мраморами и развитыми на их контактах скарнами; Таловское — недалеко от улуса Таловка, где вскрыта всего одна жила — Хлопинитовая, названная по минералу хлопиниту — разновидности эвксенита. В Тажеранском поле обнаружена своеобразная разновидность бетафита — менделеевит.

Как показали наши детальные исследования гранитов и пегматитов этих двух районов Прибайкалья, средние суммарные содержания редкоземельных элементов в них очень малы — ниже кларковых для гранитоидов (0.02%) и ниже, чем во вмещающих метаморфических породах [2]. Получается своеобразный парадокс: редкоземельная минерализация свойственна породам, которые в целом обеднены элементами группы лантаноидов. Разгадка этого парадокса заключается в ярко выраженном фракционировании некоторых элементов в пегматитовом процессе. При первичной кристаллизации породообразующих минералов (полевых шпатов, слюды, кварца) такие элементы не входят в их состав, а накапливаются в остаточном расплаве или растворе.

О последовательности кристаллизации и поведении элементов можно составить представление на основе изучения зональности пегматитов. Действительно, кристаллы фергусонита, эвксенита, бетафита и других редкоземельных минералов все-

гда встречаются в центральных частях пегматитовых жил или в зонах альбитизации, где они ассоциируют с поздними альбитом, кварцем и голубым калиевым шпатом — амазонитом. А породообразующие минералы ранних зон не содержат примесей ни лантаноидов и иттрия, ни тантала, ниобия, титана, входящих в состав поздних минералов. Наши анализы как правило дают для них результат «не обнаружено», т.е. ниже порога чувствительности, составляющего для разных элементов  $10^{-3}$ — $10^{-6}$ %. Практически все тяжелые элементы, кроме Zr и Fe, входящие в состав акцессорных минералов ранних зон, оказываются несовместимыми, т.е. не входят в качестве изоморфных примесей ни в один из породообразующих минералов первичных зон кристаллизации пегматитовых тел. Накапливаясь в остатке, они в конце концов кристаллизуются в виде наиболее устойчивых в данных условиях собственных минералов. Присутствие той или иной фазы определяется, разумеется, конкретным соотношением элементов в остаточном флюиде, температурой и давлением во время их кристаллизации.

### «Чужие» в пегматитах

Во многих месторождениях гранитных пегматитов, относящихся по составу к редкоземельным (с повышенными концентрациями Li, Be, Cs, Ta) или к слюдоносным (содержащим крупные кристаллы мусковита промышленного качества), нередко встречаются сульфидные минералы, т.е. соединения серы с различными металлами: Fe, Cu, Pb, Zn, реже Ni, As, Bi и др. Эти минералы, прежде всего пирит ( $\text{FeS}_2$ ), пирротин ( $\text{FeS}$ ), халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), характерны для совсем других типов месторождений (гидротермальных) и в принципе не должны присутствовать в гранитных пегматитах. Тем не менее они фиксиру-

ются здесь очень часто, особенно в зонах метасоматического изменения либо поздней кристаллизации.

На одном из крупнейших в мире месторождений лития и цезия — Бикита, расположенном в юго-восточной части африканского государства Зимбабве, сульфиды меди (халькопирит и халькозин —  $\text{Cu}_2\text{S}$ ) так характерны для центральных частей Главного пегматитового тела, что по зеленым и синим продуктам их изменения (малахиту и лазуриту) удается проследить ядро тела, к которому приурочены линзы поллуцита — ценного цезиевого силиката. В 1994 г. нам удалось найти довольно крупные выделения почти бесцветного сфалерита — клейофана ( $\text{ZnS}$ ), здесь не отмечавшегося. Этот минерал явно цементирует ранее образовавшиеся кристаллы кварца [3].

Совершенно ясно, что сера, присутствовавшая в небольших количествах в составе пегматитового расплава, не входила в главные минералы кристаллизовавшегося пегматита — полевые шпаты, кварц, поллуцит, Li-силикаты — петалит и сподумен, Li-слюду — лепидолит. Она накапливалась в остаточном флюиде и только в конце процесса, когда концентрация достигала необходимого уровня, а температура снижалась, образовывала сульфиды железа, меди и цинка.

В слюдоносных пегматитах основную часть жил составляют полевые шпаты, кварц и слюды (мусковит и биотит), а в качестве менее распространенных минералов здесь достаточно обычны апатит, гранат, черный турмалин (шерл) и в некоторых случаях — берилл, колумбит (сложный оксид Nb и Ta), касситерит ( $\text{SnO}_2$ ), ортит, фосфаты редкоземельных элементов — монацит и ксенотим, циркон, а также уранинит, особенно характерный для Северной Карелии. Казалось бы, сульфидам в этой группе делать нечего. Однако во многих жилах Восточной Сибири мы наблюдали пирит и пирротин. Кроме того,

в нескольких случаях зафиксированы халькопирит и галенит (PbS). А в одной из жил Чуйского месторождения геологу А.В.Ткачеву удалось обнаружить еще сульфиды висмута и такие редкие соединения, как селенид свинца и теллурид серебра!

Каково же положение сульфидной (и подобной ей) минерализации в слюдоносных пегматитах? Как и в редкометалльных объектах, сульфиды обычно наблюдаются в центральных частях пегматитовых тел, формировавшихся от периферии к центру, т.е. в участках остаточной кристаллизации. Кроме того, выделения пирротина могут входить в состав секущих метасоматических зон кварц-мусковит-плагиоклазового состава, явно более поздних, чем зоны первичной кристаллизации. Наконец, кристаллы галенита обнаружены нами в небольших пустотах, инкрустированных гребенчатыми кристаллами альбита поздней генерации. Они образовались в самом конце нового повышения щелочности растворов — заключительной стадии послемагматических процессов в мусковитовых пегмати-

тах [4].

Таким образом, чуждые редкометалльным и слюдоносным пегматитам сульфидные минералы возникают только в самом конце процесса вследствие накопления серы (селена или теллура) и металлов в остаточных растворах — уже на послемагматическом этапе формирования пегматитов.

### Минералогическое разнообразие «карманов»

Пожалуй, самое большое число редких минералов, связывающих в своем составе элементы, несовместимые с элементами главных минералов пегматитовых жил, наблюдается в так называемых миароловых пегматитах. Это пегматитовые жилы, содержащие крупные или мелкие полости, а в них — кристаллы как породообразующих, так и разнообразных второстепенных или очень редких минералов (см. таблицу). Полости называют в разных странах (и даже в отдельных частях стран) по-разному: миаролы, занорыши, ка-

меры, пещерки, карманы. Именно в таких полостях находят крупный горный хрусталь — прозрачные бесцветные или слабо окрашенные кристаллы кварца, а также драгоценные камни (хорошо окристаллизованные и прозрачные аналоги непрозрачных минералов, развитых в основной массе пегматитовых тел): аквамарин, гелиодор, морганит, топаз и турмалин всех цветов радуги, кунцит и гидденит.

Даже при беглом взгляде на список минералов, встречающихся в миароловых пегматитах, мы видим, что среди них немало концентраторов не характерных для гранитной магмы элементов — Sb, Bi, As, Pb. Они обычны в гидротермальных рудных месторождениях (как правило — в составе сульфидов), но в гранитных пегматитах их появление выглядит несколько странно. Тем не менее многие из упомянутых в таблице минералов были впервые обнаружены именно в пегматитах [5]. При этом средние содержания странных элементов в пегматитовых телах очень низки, и мы опять имеем пример экстремального их концентрирования.

Некоторые редкие минералы, встречающиеся в полостях миароловых пегматитов

Минералы		
ниобия и тантала, редкоземельных элементов, урана и тория	висмута, ванадия, сурьмы, мышьяка и серы	разные
алланит, или ортит	бейерит	боромусковит
бастнезит	бисмит	воробьевит, или морганит (Cs-бериллы)
бехиерит	висмутоколумбит-висмутотанталит	гамбергит (гидроксилборат Be)
гадолинит		данбурит (боросиликат Ca)
гелландит	висмутомикролит	ильменит-пирофанит
иксиолит	геокронит	(оксиды Fe, Ti, Mn)
ильменорутит-стриюверит	зимбабвеит	касситерит (оксид Sn)
колумбит-танталит	клинобисванит	кукеит (Li-хлорит)
микролит-пирохлор	намибит	литофилит-трифилин (фосфаты Li, Mn, Fe)
минасжерайсит	пухерит	петалит (силикат Li и Al)
ринерсонит	стибиоколумбит-стибиотанталит	поллуцит (силикат Cs, Na и Al)
самарскит		секанинаит (алюмосиликат Fe и Mg)
ферсмит		сподумен, кунцит, гидденит (Li-пироксены)
эвксенит-поликраз	стибиомикролит-стибиобетафит	тетравикманит (гидроксид Mn и Sn)
эшинит		тусионит (борат Mn и Fe)
		циркон-гафнон (силикат Zr и Hf)

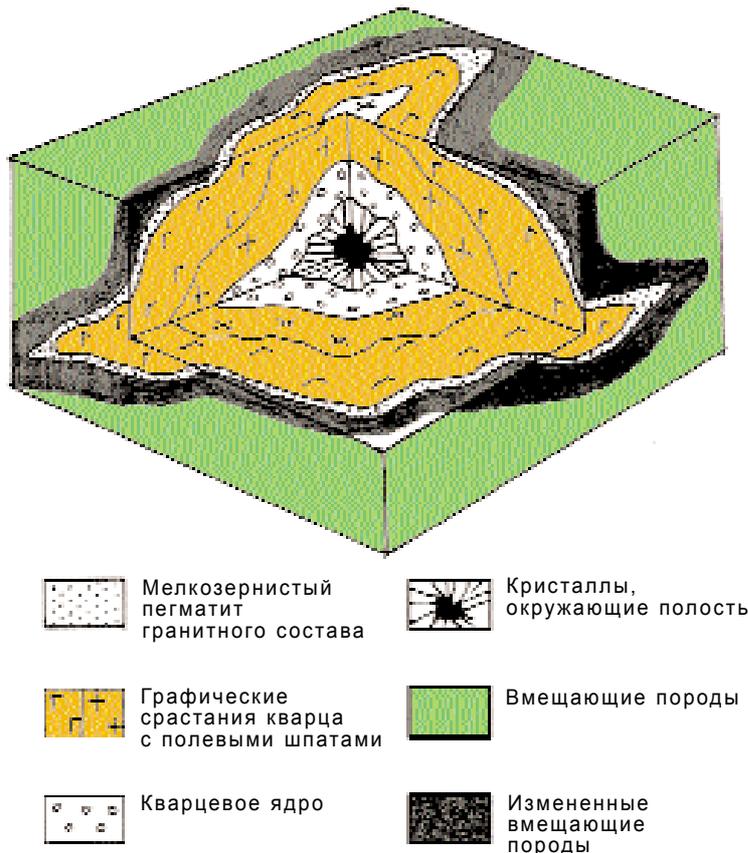


Схема строения тела гранитных пегматитов с миароловой полостью.

Уже в 1846 г. был открыт силикат цезия — поллукит в миароловых пегматитах о. Эльба в Тирренском море. Ни вмещающие гранодиориты, ни пегматитовые жилы при их валовом анализе не характеризовались сильно повышенными концентрациями редких щелочей (Li, Rb, Cs). Однако сравнительно небольшие пегматитовые жилы возле Сан-Пьеро-ин-Кампо дали мировой науке ряд новых минеральных видов, а музеям всего мира — массу уникальных образцов с прозрачными кристаллами эльбаита (названного по имени острова), петалита, спессартина (розовато-оранжевого граната), микролита, гамбергита, многих минералов группы цеолитов.

В наши дни наиболее яркий пример широкого круга минералов, концентрирующих элементы, несовместимые с пороодооб-

разующими минералами пегматитов, представляет Малханское месторождение в Центральном Забайкалье, изучаемое моими коллегами В.Е.Загорским и И.С.Перетяжко на протяжении многих лет. Это уникальное месторождение цветных турмалинов, топаза, данбурита, воробьевита, поллукита связано с субредкометалльными гранитными пегматитами. В них несколько повышены (по сравнению со средними цифрами для пегматитов) содержания Li, Pb, Cs, Be, Sn, Ta и Nb, хотя они и уступают концентрациям этих элементов в собственно редкометалльных пегматитах.

В миаролах Малханских пегматитов встречаются многочисленные редкие минералы, образованные на последних стадиях пегматитового процесса и содержащие элементы, концентрации

которых в средних пробах относительно невысоки: Sb, Zr, Hf, Ti, редкие земли, уран и торий.

Любопытно также повышенное содержание висмута в виде примеси (от 2 до 15 г/т) в полевых шпатах, кварце, слюдах. При недостатке тантала, ниобия или серы, которые образуют танталониобаты и сульфиды Bi и Pb, эти два элемента входят в состав турмалина, кристаллизующегося в миаролах. Так, на жиле Западная-1 поздний турмалин содержит до 0.55%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и 0.54% PbO. Аналогичные явления, по данным Р.Шигли, наблюдаются в некоторых турмалинах Бразилии (до 0.83%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  и 2.38% CuO), а также Памира и Гиндукушского хребта.

## Кристаллы-метасомы

Концентрирование несовместимых элементов на последних стадиях пегматитового процесса происходит не только при образовании полости в центральных частях пегматитовых тел (при проявлении миароловой фации [6], которая свойственна в равной степени пегматитам разных формаций: кристаллоносной, редкометалльной, слюдоносной). Мы уже упоминали о редкоземельных минералах и сульфидах на заключительных стадиях формирования пегматитов, лишенных полостей. В некоторых случаях поздние минералы явно ксеноморфны (они подчиняются очертаниям ранее образовавшихся кристаллов, заполняя промежутки между ними). Однако не менее распространены и поздние индивиды минералов, имеющие собственную огранку. Такие случаи требуют особого внимания.

Как показал в свое время один из крупнейших знатоков пегматитов В.Д.Никитин, детальный анализ поверхности кристаллов уранинита, касситерита, граната и других минералов на их контакте с вмещающими полевыми шпатами и кварцем свидетельствует о том, что акцессор-



*Фергусонит из центральной части пегматитовой жилы. Длина образца 7 см. Месторождение Слюдянка (южный берег Байкала).*

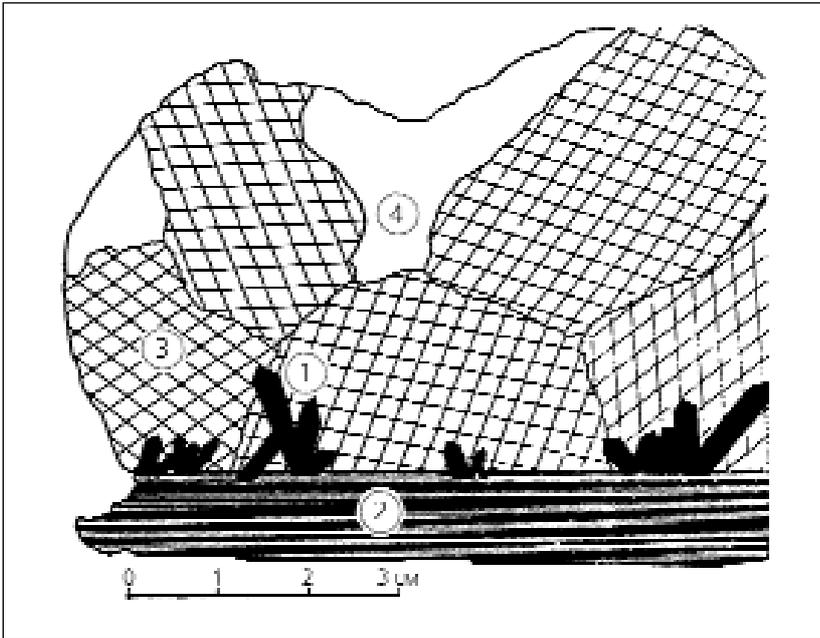


*Прозрачный воробьевит из занорыша. Длина образца 3 см. Завитинское месторождение (Забайкалье).*



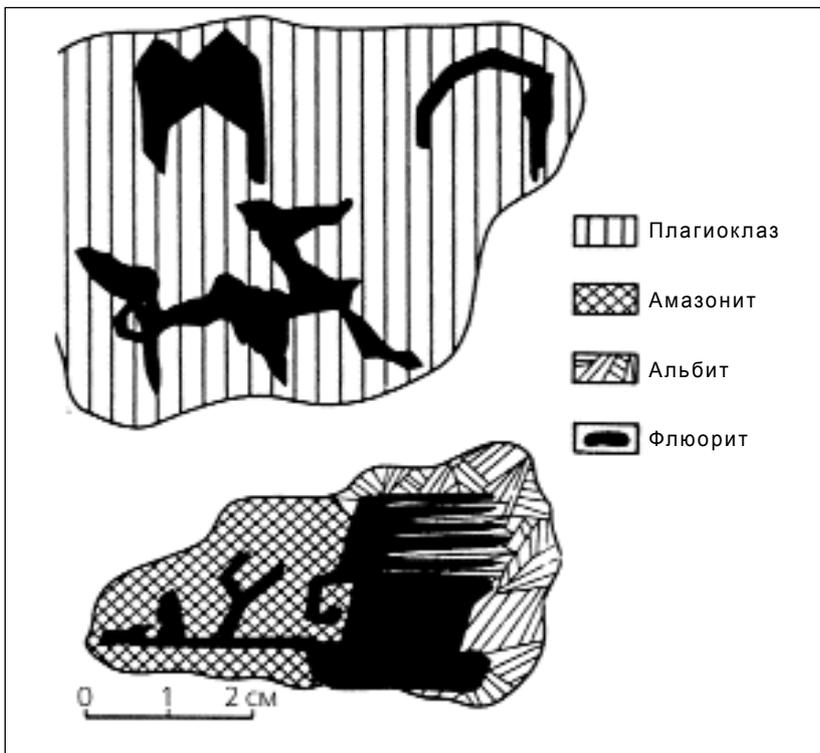
*Глыбы поллуцита, окрашенные в зеленый цвет продуктами окисления медного колчедана. Месторождение Бикита (Зимбабве).*

*Фото автора*



Идиоморфные кристаллы циркона (1), нарастающие на пластину биотита (2) и замещающие полевой шпат (3) и кварц (4). Месторождение Куру-Ваара (Карелия).

Рисунок А.Г.Жабина



«Скелетные» метакристаллы флюорита. Пегматиты Западных Кейв (Кольский п-ов).

Рисунок А.Я.Лунца

ные минералы активно «завоевывают» пространство. Они идиоморфны (имеют свойственные им формы кристаллов, хотя образуются позже окружающих минералов). Причина таких взаимоотношений заключается в механизме роста кристаллов-метасом (метакристаллов), замещающих окружающую среду. В тонкой пленке флюида, разделяющего замещаемые и растущие минералы, происходит одновременно растворение неустойчивых в данных условиях фаз и кристаллизация новых — со свойственной им огранкой, соответствующей именно их кристаллической решетке.

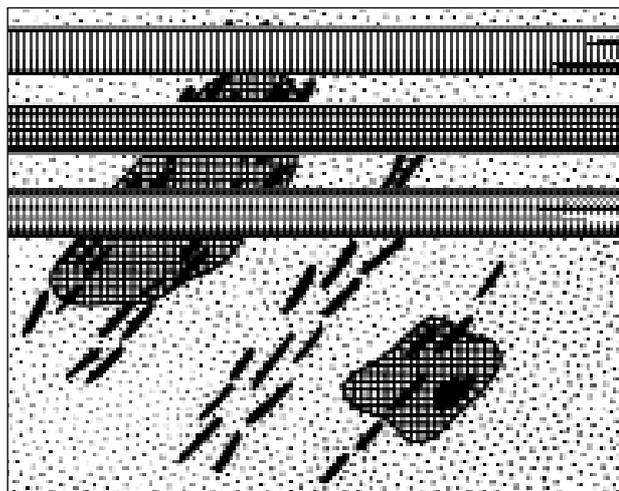
Особенно много примеров кристаллов-метасом и агрегатов минералов, образующихся на поздних стадиях пегматитового процесса, наблюдается в пегматитах редкометалльно-редкоземельной формации, которые занимают по величине начального давления промежуточное положение между собственно редкометалльными и кристаллоносными пегматитами. Здесь мы видим образование причудливых по форме кристаллов и агрегатов флюорита ( $\text{CaF}_2$ ), а также фергусонита, самарскита, эвксенита.

Иногда более позднее формирование минералов этой группы совершенно явное: их зерна или цепочка кристаллов пересекают границы между зернами ранее образовавшихся минералов. В других случаях необходимо тщательное изучение граней кристаллов-метасом, чтобы показать, что они действительно выросли в процессе замещения окружающих минералов, что их идиоморфизм не означает более раннее образование.

Пегматиты такого типа достаточно широко распространены в нашей стране и детально изучались на Кольском п-ове, в Ильменских горах на Урале, в Прибайкалье.

Целочки метакристаллов фергусонита, пересекающие зерна магнетита и мелкозернистый альбитовый агрегат. Гора Плоская (Кольский п-ов).

Рисунок А.Я.Лунца



## Концентрирование элементов в процессе эволюции пегматитов

Как было показано П.Черны с соавторами, экстремальное фракционирование элементов происходит на всем протяжении формирования пегматитов: при зарождении и дифференциации гранитных магм, а затем в самих пегматитовых телах [7]. При этом наиболее резкое фракционирование наблюдается в зональных пегматитах с постепенной эволюцией состава во времени.

Подчеркнем еще раз, что редкие элементы, присутствующие в пегматитовом расплаве, делятся на две группы: совместимые с породообразующими минералами и входящие в них полностью или частично в виде изоморфных примесей и несовместимые, которые накапливаются в остаточном расплаве или растворе. К первым относятся Ge, Ga, Mn — кристаллохимические аналоги Si, Al и Fe, а также Rb, Ba, Sr — аналоги K и Ca. Ко вторым — редкоземельные элементы (иттрий и лантаноиды), Th и U, Nb и Ta, Bi и Sb, S и As, целая группа халькофилов. Летучие компоненты (OH, F, Cl, B, P) частично могут входить в состав рано кристаллизующихся слюд,

турмалина, апатита, но основная их масса накапливается в остаточном флюиде. Кроме того некоторые редкие элементы, например Be, Zr, Sn, в зависимости от ряда факторов (щелочности расплавов, режима температуры и давления, исходной концентрации) входят в состав рано кристаллизующихся акцессорных минералов (берилла, циркона, касситерита) или тоже сохраняются во флюидной фазе.

Определяющий момент в эволюции большинства пегматитовых тел, имеющих магматический генезис, — закрытость пегматитовой системы, т.е. автономное развитие отделившейся порции расплава. Именно этим, в соответствии со взглядами А.Е.Ферсмана, К.А.Власова, А.И.Гинзбурга и их последователей, пегматитовый процесс отличается от пневматолитового и гидротермального. Закрытость (замкнутость) системы создает условия для сохранения всех ее компонентов, для изменения давления, связанного с наличием в расплаве летучих компонентов и эволюцией температуры, для последовательной кристаллизации зон от периферии к центру.

Кристаллизация внешних зон пегматитовых тел обычно начинается с образования мелкозернистой (вследствие быстрого ох-

лаждения) оторочки состава, близкого к гранитному, т.е. с соотношениями компонентов, отвечающими валовым концентрациям. Эта оторочка создает изолирующий «футляр», внутри которого происходит автономное развитие процесса дальнейшей кристаллизации. Если состав оставшегося расплава близок эвтектическому, далее идет длительная совместная кристаллизация кварца и полевых шпатов, нередко в виде графических сростаний. Выход из расплава большей части Si, Al, K, Ca, Na и их аналогов приводит к постепенному возрастанию концентраций остаточных элементов, прежде всего Fe и Mg, которые вместе с частью летучих (OH, F) и редкими элементами группы железа образуют кристаллы биотита. Обычно они заполняют трещины в графической зоне, возникшие при сокращении объема охлаждающейся системы.

Дальнейшая эволюция остаточного пегматитового расплава идет неодинаково в различных формациях — в зависимости от давления, температуры и состава исходной магмы. Нередко на ход процесса влияет ликвация (разделение) расплава и самостоятельное развитие его частей. Главные образующиеся минералы — это силикаты и алюмосиликаты щелочных элементов:

Li — петалит и сподумен, K — мусковит и калиевый полевой шпат, Na — альбит. Если имеется избыток кремнезема, в центре пегматитового тела формируется крупное кварцевое ядро или серия кварцевых линз. Несовместимые же элементы вместе с летучими компонентами все еще сохраняются в остаточном флюиде.

Даже в «пустых» (со средними концентрациями редких элементов) пегматитовых телах мы иногда наблюдаем (как правило, в их верхних или центральных частях) гнезда с лепидолитом, бериллом, колумбит-танталитом, цветным турмалином, т.е. минералами, свойственными редкометалльным жилам. В других случаях возникает целая гамма редкоземельных фаз. Разумеется, конкретная ассоциация, образующаяся при кристаллизации остаточного флюида, определяется и термодинамическими условиями, и исходными содержаниями элементов, и ходом начального минералообразования [8]. Кроме того, возможен уход остатка за пределы пегматитовой жилы, если этому способствует тектоническая обстановка.

Минералогически наиболее интересны продукты экстремального концентрирования несовместимых элементов в центральных частях жил, когда в полостях или в результате метасоматических процессов возникают странные для данного типа пегматитов минералы или, казалось бы, невозможные комбинации элемен-

тов, остающихся во флюидной фазе. Именно так в небольших карманах одной из редкометалльно-мусковитовых жил в Зимбабве образовался тантало-ниобат мышьяка, свинца и щелочных элементов — зимбабвеит, в редкометалльных пегматитах Бразилии появился силикат бериллия, иттрия и кальция — минасжерайсит, в миароловых пегматитах США возникли ванадаты висмута — клинобисванит и пухерит, а в редкометалльных пегматитах Намибии — ванадат висмута и меди, названный намибитом.

Нет сомнения в том, что в ближайшие годы мы станем свидетелями открытия в гранитных пегматитах ряда новых минеральных видов — подчас совсем не гранитных или даже невероятных по сочетанию элементов. Залог этому — всегда наблюдающееся в специфических условиях закрытой эволюционирующей пегматитовой системы экстремальное концентрирование многих редких элементов. ■

**Работа выполняется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 98-05-64197.**

## Литература

1. Шмакин Б.М. Удивительный мир пегматитов // Природа. 1988. № 4. С.58—68.
2. Shmakin B.M. // Applied Geochemistry. 1992. V.7. №5. P.459—468.
3. Shmakin B.M., Wedepohl A.I. Some geological, mineralogical and geochemical features of the Bikita rare element pegmatite deposit // Intraplate magmatism and tectonics of S.Africa. Harare, 1997. P.46—47.
4. Шмакин Б.М. Мусковитовые и редкометалльно-мусковитовые пегматиты. Новосибирск, 1976.
5. Загорский В.Е., Перетьяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Новосибирск, 1999. Т.3: Миароловые пегматиты.
6. Шмакин Б.М. Пегматитовые месторождения зарубежных стран. М., 1987
7. Cerny P., Meintzer R.E., Anderson A.J. // Canad. Mineralogist. 1985. V.23. P.381—421.
8. Shmakin B.M., Makagon V.M., Zagorsky V.Ye., Peretyazhko I.S. // Canad. Mineralogist. 1999. V.37. № 3. P. 843—844.