

МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ И ГЕОХИМИЧЕСКОЕ
РАЗНООБРАЗИЕ ПРИРОДЫ

© 2003 г. Е. И. Семенов

*Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН
117071 Москва, Ленинский просп., д. 18, корп. 2*

Поступила в редакцию 21.12.2001 г.

Как известно в синэргетике, разнообразие является главным критерием выживаемости и способности к эволюционному развитию любой сложной системы – живой или неживой.

Месторождения, их руды и породы резко отличаются по сложности, количеству обнаруженных в них минеральных видов и концентраций химических элементов. Бедны минералами (до 10) многие анхимономинеральные, преимущественно осадочные породы типа известняков, кварцитов. Из магматических пород это – оливиниты, пироксениты и др. В то же время огромным минералогическим разнообразием (>500 минералов) обладают массивы агпаитовых содалит-нефелиновых сиенитов типа Хибин-Ловозера (Кольский п-ов) или Илимаусака (Гренландия). Однако в пределах этих массивов и слагающих их комплексов (луавритов, фояитов, гипербазитов, карбонатитов) есть крупные участки ранних высокотемпературных магматических пород (ийолитов, сиенитов), бедных минералами (до 50) и есть небольшие (сотни кв. метров) участки широкого проявления поздних пород (содалитовых, эгириновых, рибекитовых) и, особенно, их пегматит-пневматолит-гидротермальных дериватов. При этих процессах, характеризующихся богатством щелочами и летучими (Na, K, Li, Rb, F, Cl), образуется главная часть минеральных видов, особенно редкометальных (Be, Sr, Nb, Tr и др.) [1, 2, 3]. Чем выше исходный потенциал щелочей и летучих (отражающийся на их концентрациях в амфиболах, слюдах), тем больше возникает (на разных стадиях процесса) парагенетических ассоциаций (до 6 зон в пегматитах Ловозера) и тем минералогически разнообразнее эти ассоциации. В одной усингитовой зоне – ассоциации насчитывается около 40 минералов. В Хибино-Ловозерском массиве открыто более 100 новых минералов; столь же велики возможности новых открытий. При детальном исследовании пород и руд по мере установления минералогического разнообразия шансы установления новых (прежде всего, для данного месторождения) минералов увеличиваются. Малы эти шансы для повсеместно распростра-

ненных типов месторождений и пород (нешелочные гипербазиты, базиты, граниты).

В вертикальном разрезе расслоенных щелочных комплексов Ловозера и Хибин ультранатриевые пегматиты концентрируются около богатых лопаритовых NbTaCe-рудных горизонтов, а ультракалиевые – около апатитовых SrCePF-руд. Минералогическое разнообразие таких пегматитов можно оценивать не только по площади (на м²), но и по разрезу (на м³ породы). Для подобного разнообразия важно изначальное или возникшее при дифференциации расплава и раствора разнообразие сконцентрированных химических элементов. Однако эти элементы существенно различаются между собой по степени минералогической индивидуализированности: лишь 40 элементов таблицы (отмечены крестами) образуют собственные минералы. Из-за большого кристаллохимического (прежде всего, размерного) родства Rb и K, Ga и Al редкие Ga, Rb не формируют (даже при содержаниях порядка 0.1%) минералов, а рассеиваются в структурах КАI-силикатов. В то же время бериллий, не имеющий порообразующих “конкурентов”, знаменит разнообразием своих минералов, возникающих при очень небольших его содержаниях в породе (0.01%). Характерно и сродство бериллия “к самому себе” в структуре его минералов: даже при небольших содержаниях BeO (8% в соренсените, эпидидимите) бериллиевые тетраэдры попарно сцепляются, образуют кластеры. Нормируя на кларковые, фоновые содержания, элементы можно расположить в следующий ряд “минералогической индивидуальности”: Be, Mo, Cu, Pb, Zn, Li, F, B, Nb, P, Mn, Sr, Ce, S, Zr, V, U. Характерно наличие среди “лидеров” легчайших редких элементов – Li, Be, B; халькофилов – Cu, Pb, Zn; элементов переменной валентности Mn, V, U, S; щелочей и неметаллов – комплексообразователей P, F. Кроме нефелиновых сиенитов, многими из этих элементов обогащены другие типы месторождений, отличающиеся большим минералогическим разнообразием (150–300 минералов). Таковы MnZn-руды типа гондитов в Лонгбан (Швеция), Франклин Фернес (США), Жайрем (Казахстан); GaGe-полиметаллические руды

и их зона окисления в Цумебе (Намибия), уран-кобальт-медные гидротермалиты и их зона окисления в Шинколобве (Заир), жилы “альпийского” типа и гидротермалиты (Швейцария, П. Урал), гранит-пегматиты литий-фосфатного типа (США, Забайкалье).

Большим минералогическим разнообразием отличается зона окисления многих сульфидных месторождений, особенно обогащенных As, V, Mn и редкими элементами. Разнообразна и эффективна (крупные совершенные кристаллы) минерализация, образовавшаяся “в свободном пространстве”: в занорышах пегматитов, в карстовых пустотах и т.д. Это определяется постепенностью изменения температур и давлений, большим диапазоном и частой сменяемостью физико-химических условий (рН, еН). Разнообразие Mn-минералов связано с его поливалентностью (особенно нечетные валентности 3, иногда 1, 7). Даже самородный Mn имеет самую сложную структуру (56 атомов в ячейке). Полиминеральность урана во многом определялась широким фронтом работ по поискам его месторождений. Большое разнообразие минералов возникает на контакте контрастных сред. Таковы, например, контакты бедных Ca и Mg фтор-активных щелочных пород (фоидитов, гранитов) с богатыми ими породами с кальцитом, доломитом, серпентином (мраморами, амфиболитами, зеленокаменными породами). Так, в контакте Ильменских и Вишневогорских миаскитов с серпентинитами развиваются MgCr-чевкинит, в котором свойственные миаскитам Ce, Nb сочетаются с Mg, Cr из серпентинитов. В контакте фоидитов с мраморами Сангилена (Тува) развиваются богатые кальцием флюорит, везувин, андрадит, мелинофан, пироклор-минералы Be, TR, выносимых, вместе со фтором, из фоидитов. В фенитовой зоне воздействия фоидитов на гнейсы Кольского п-ова возникают богатые кремнием силикаты Ti, Zr, Nb, Be, Li, выносимых из фоидитов (нарсарсуцит, эльпидит, эпидидимит). Взаимодействие морской воды, богатой Mg, Na, Cl, S, и придонных сульфидоносных гидротермалитов приводит к образованию оксихлоридов меди (атакамит), окисульфатов магния (каминит). Наиболее полиминеральны агпайтовые породы (Ussing 1911) с максимальными, пиковыми концентрациями щелочных, летучих и редких элементов.

Могут выделяться минеральные пики агпайтоности для элементов [для TR-витусит $\text{Na}_3\text{Ce}(\text{PO}_4)_2$] и пород: гипербазитов (Ковдор и др. – енаит, претулит ScPO_4 , флюоборит $\text{Mg}_3\text{BO}_3\text{F}_3$), базитов (Норильск – талфенисит $\text{Tl}_6\text{Fe}_{25}\text{S}_{26}\text{Cl}$, полярит Pd_2PbBi); фоидитов (Сентилер – хорватит NaYCO_3F_2 , цирсианит, натросилит, ридерит); гранитов глиноземистых (Берниклейк – поллуцит $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$, цезистибтантит $\text{CsSbTa}_2\text{O}_7$) и железистых (Катуга –

Максимальные содержания элементов в агпайтовых породах в соотношении с фоновыми (кларками изверженных пород)

Элементы	Агпайтиты	Кларки	Отношения	Минералы
Li	0.1330	0.0032	42	+
Na	12.7200	2.5000	5.1	+
K	5.5000	2.5000	2.2	+
Rb	0.1200	0.0150	8.0	
Cs	0.0077	0.0004	19	
Be	0.0045	0.00038	12	+
Mg	0.5900	1.8700	0.32	+
Ca	0.9900	2.9600	0.33	+
Sr	0.1200	0.0340	3.5	+
Ba	0.1500	0.0650	2.3	+
Mn	0.7500	0.1000	7.5	+
Fe	16.9600	4.6500	3.6	+
Co	0.0005	0.0018	0.3	+
Ni	0.0070	0.0058	1.2	+
Cu	0.0364	0.0047	7.7	+
Zn	0.2751	0.0083	3.3	+
Cd	0.00009	(0.00001)	9	
B	0.0038	(0.0012)	3	+
Al	11.4400	8.0500	1.4	+
Sc	(0.0003)	0.0010	0.3	
Y	0.1100	0.0029	38	+
La	0.3350	0.0029	110	+
Ce	0.4900	0.0070	70	+
Nd	0.1000	0.0037	25.0	+
Sm	0.0190	0.0008	24	
Eu	0.0023	0.0001	23	
Gd	0.0220	0.0008	27	
Yb	0.0100	0.00003	330	
Ga	0.0215	0.0019	11	
Tl	0.0010	(0.0001)	10	+
Si	25.9200	29.5000	0.9	+
Ti	0.8900	0.4500	2.0	+
Zr	2.6500	0.0170	156	+
Hf	0.0855	0.0001	855	
Ge	0.00008	0.00014	0.6	
Sn	0.0370	0.0002	165	+
Pb	0.0541	0.0016	34	+
Th	0.0172	0.0013	13	+
U	0.0275	0.0013	21	+
P	0.2200	0.0930	2.4	+
V	0.0108	0.0090	1.2	
Nb	0.1900	0.0020	95	+
Ta	0.0100	0.00025	40	+
As	0.0002	(0.00017)	1.2	+
Sb	0.0004	(0.00005)	8	+
S	0.2400	0.0470	5.1	+
Cr	0.0035	0.0080	0.4	
Mo	0.0078	0.00011	75	+
W	0.00077	0.00013	6	+
H	0.2870	0.1300	2.2	+
F	1.1800	0.0660	18	+
Cl	3.5100	0.0170	210	+
Br	0.00006	0.0002	0.3	
J	0.00005	0.00004	1.2	

гагаринит NaYF_4), карбонатитов (Вуориярви – карбоцернаит $\text{NaSrCaCe}(\text{CO}_3)_4$), боратитов (Боракс – типлеит $\text{Na}_2\text{B}(\text{OH})_4\text{Cl}$, кернит), нитратитов (селитры Атакамы – дитцеит $\text{Ca}_2(\text{JO}_3)_2\text{CrO}_4$), фторидитов (Ивигтут – криолитионит $\text{Na}_3\text{Li}_3\text{Al}_2\text{F}_{12}$, беггилдит), хлоридитов (Стасфурт – сильвин (К, Rb) (Cl, Br), арсеносульфидов (Биненталь – имхофит TlAs_3S_5 , квадратит AgCdAsS_3 ; Хемло – кридлит $\text{TlAg}_2\text{Au}_3\text{Sb}_{10}\text{S}_{10}$, Предборжице – хакит $\text{TlAgCu}_8\text{Hg}_2\text{Sb}_3\text{AsSe}_{13}$).

Все указанные агпаитовые, пиковые “минералы – безводные”, с высоким содержанием щелочей (Li, Na, K, Rb, Cs, Td амины) и летучих неметаллов (F, Cl, Br, I, Se). Эти минералы содержат редкие элементы, характерные для своего типа месторождений: Sc – в гипербазитах и базитах; TR, Zr, Nb – в железистых гранитах, фойдитах и карбонатитах; Ta, Li, Cs – в глиноземистых гранитах; Br – в хлоридитах; Tl, Ag, Au, Se – в арсеносульфидах.

Характерно нахождение здесь крупных тяжелых ионов (Cs, Tl, Se), а также легких He (особенно изотопа 3), Li, Be, B, дефицитных в Земной коре, но избыточных в Космосе. Эти легкие элементы имеют минимальную оптическую рефракцию (вероятны ценные ювелирные качества у фторборатов Li, Be типа гамбергита и др.). Агпаитовые условия часто экстремальны по окислительно-восстановительным потенциалам: максимальная окисленность у йода (5+) и хрома (6+) в нитратных системах и обычно минимальная – в оксидных (Fe). Характерны в агпаитовых ассоциациях нечетные элементы 1, 3, 5, 7-го рядов (щелочи, галоиды, B, P, Mn, Re).

Часто щелочные соли – это соединения сильных щелочей и слабых кислот (B, C, Si, P, F). Сильные кислоты (HCl , H_2SO_4) агпаитовых солей (почти) не образуют. Возможно, к ним относятся целестин, барит $(\text{Sr}, \text{Ba})\text{SO}_4$, а также ганксит, беркит $\text{Na}_6(\text{SO}_4)_2\text{CO}_3$ из осадков и рассолов оз. Серлз, богатых Li, B, W. Карналит из калий-хлоридных и сульфатных пород Стасфурта и Соликамска иногда обогащен рубидием, бромом. Для агпаитовых пород характерны многокомпонентные минералы, содержащие сразу несколько редких элементов. Таковы накарениобсит $\text{Na}_3\text{Ca}_3\text{CeNbSi}_4\text{O}_{15}\text{F}$, семеновит $\text{Na}_8\text{Ca}_2\text{FeBe}_6\text{Ce}_2\text{Si}_{14}\text{O}_{40}\text{F}_8$ (сочетания Ce–Nb и Ce–Be с Na–F), упоминавшийся выше хакит (TlAgHg–Se). При нормировке на средние составы минералов и пород сложные сочетания редких элементов выявляют огромную информационную ценность агпаитовых минералов и ассоциаций. Агпаитовые минералы обычно имеют низкие температуры плавления и твердость, большие объемы элементарной ячейки, весь спектр окрасок.

Вместо воды в минералах каркасной цеолитной структуры (эдингтонит, лемуанит) могут при-

сутствовать солевые борные и хлорные компоненты – в кальборсите $\text{K}_6\text{Al}_4\text{Si}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4\text{Cl}$, алтисите $\text{K}_6\text{Na}_3\text{Al}_2\text{Ti}_2\text{Si}_8\text{O}_{26}\text{Cl}_3$. Легко выносятся водой фосфаты натрия из агпаитового вуоннемита, превращающегося в эпистолит. Неустойчивость, изменяемость является характерной чертой агпаитовых минералов, обладающих максимальной сложностью состава и структуры (с множеством правильных систем точек – эвдиалит, ломоносовит и др.).

Симметрия агпаитовых минералов, по А. Хомякову [7], обычно низка. Весьма характерна для агпаитовых ассоциаций их многофазность, полиминеральность, как из-за многообразия слагающих их элементов и ионов, так и из-за благоприятных для полиминеральности условий образования. Количество минеральных видов в одной агпаитовой уссингитовой ассоциации (зоне) пегматита Аллуайва (Ловозеро) или одной натролит-альбитовой зоне пегматитов Карнасурта или Сентилера превышает 50 (до 80). В краевых железистых (эгириновых) зонах пегматита Аллуайва содержится меньше минералов (около 20), но общее число видов одного пегматита достигает 100.

Этот пегматит характерен для пород одного типа науяитов (в типе около 130 минералов). Кроме них, в Ловозере и родственных прилегающих Хибинах есть еще 7 типов фойдитов. Каждый тип имеет свои пегматиты с несколькими (обычно 2–3) зонами – ассоциациями. Итого около 20 таких ассоциаций (плюс иногда присутствующая своя эпитеральная и гипергенная гидролизная ассоциация).

Общее число минеральных видов в дериватах фойдитов Хибино-Ловозерского массива – более 500 [4]. В массиве присутствуют небольшие тела щелочных гипербазитов и карбонатитов. Эти породы широко развиты поблизости (первые км, десятки км) от Хибин-Ловозера, образуя единую Кольскую щелочную формацию: от пород форстерит-диопсид-мелилитовых до кальсилит-нефелиновых, а также содалит-эгирин-полевошпатовых и карбонатных.

Общее число ассоциаций в этой формации около 50, а число минеральных видов ≈ 800 .

Максимально минералогическое разнообразие в агпаитовых дериватах Na-фойдит-науяитов (Ловозеро), K-фойдит-рисчорритов (Хибин) и гипербазит-фоскоритов (Ковдор, Африканда).

Это разнообразие характерно и для органических веществ указанных пород. Так, в пегматитах Ловозера и Хибин встречены натроксалат и твердые углеводороды: карбоцер, карботор, антраксолит, импсонит, асфальтит. Хроматографическое и масс-спектрометрическое изучение пород выявило широкое распространение (в виде включений и т.д.) большой гаммы сложных циклических и ароматических углеводородов, включая фосфор- и азотсодержащие (амины и др.) [4, 5, 6].

Азот- и фосфорсодержащие углеводороды, как известно, являются компонентами дезоксирибонуклеиновой кислоты ДНК – генетической основы жизни. В органике сложных агпаитовых минеральных систем (Ловозеро) обнаружены концентрации и экологически опасных канцерогенных веществ (бензпирена и др.) [5].

Исследование разнообразия органических и неорганических минералов может быть аналогом важнейшей, получившей широкое развитие проблемы ЮНЕСКО по биологическому разнообразию. И в минеральном царстве разнообразие видов является гарантией устойчивого существования (проявления) соединений химических элементов при резких изменениях физико-химических условий среды минералообразования.

Полевые шпаты (альбит и микроклин) по содержанию SiO_2 занимают промежуточное положение между кварцем SiO_2 и нефелином $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, недосыщенным SiO_2 . Поэтому полевые шпаты могут ассоциировать как с кварцем, так и с нефелином в самых разнообразных породах (до тысячи парагенезисов).

Важнейшим фактором минералогического разнообразия является разнообразие геохимическое. Так, агпаитовые породы Илимаусака (луявриты, нефелин-содалитовые сиениты) по аналитическим данным [7] содержат в количествах, превышающих два фона – кларка 48 химических элементов – значительно больше половины от всех устойчивых элементов. В этих породах установлено содержание (см. табл.):

более 100 (до 850) –	Zr, Hf, Yb, La, Cl кларков
>50	Nb, Ce, Mo
>20	Ta, Y, Pb, Eu, Nd, Sm, Cs, U, Gd, Li
>10	Be, Ga, Th, F, Tl, Sb
>5	Rb, Mn, Na, Cu, S, Zn, W
>2	K, Sr, Ba, Fe, Ti, P, B, H

В Илимаусаке обильны минералы, богатые Ag, Co, Pr, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, для которых также вероятен повышенный кларк, хотя в породах они не определялись. Один кларк и менее свойственен ряду породообразующих элементов (Si, Al, Ca, Mg, O) и халько-сидерофилов, обычных в гипербазитах (Cr, Sc, Ni; возможно, Pt, Hg). В то же время многие высокотемпературные анхимономинеральные породы типа дунитов, анортозитов (без щелочей и летучих) обогащены (и не в такой степени) не 48 элементами, а всего около 10.

Содержание, например, всех 14 лантаноидов в дунитах и офиолитах часто на несколько порядков меньше кларка. Отношение числа элементов с “положительными” и “отрицательными” кларками для таких пород значительно меньше 1, а для Илимаусака – намного больше. Сумма соотношений 55 элементов агпаитов и кларков около 2500 (на один элемент – 45). Существенно увеличиваются в агпаититах отношения редких и породообразующих изоморфных элементов: Rb/K, Ga/Al и др. [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Когарко Л.Н.* Проблемы генезиса агпаитовых магм. Наука, 1977.
2. *Семенов Е.И.* Минералогия щелочного массива Илимаусак. Наука, 1969.
3. *Семенов Е.И.* Оруденение и минерализация редких земель, тория и урана. ГЕОС, 2001.
4. *Semenov E.* Minerals and ores of the Khibiny-Lovozero alkaline massif, Kola. Fersman Museum, 1997.
5. *Бушев А.Г., Семенов Е.И. и др.* Токсичные органические минералы и вещества. Изд. ВИМС, 2000.
6. *Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И.* Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. Наука, 1989.
7. *Герасимовский В.И.* Геохимия Илимаусакского щелочного массива, Ю.З. Гренландия. Наука, 1969.
8. *Хомяков А.П.* Минералогия ультраагпаитовых щелочных пород. Наука, 1990.