

МАГМАТОГЕННО-ЛИКВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ И ЕЕ ПРИКЛАДНЫЕ СЛЕДСТВИЯ

Г.Б. Мелентьев

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13 стр. 2, Россия

Обсуждается роль ликвации в процессах редкометалльного рудообразования и ее прикладные следствия: в разработках рационального комплекса методов локализации поисков редкометалльных гранитных пегматитов, в распределении редких и лимитируемых компонентов в рудных полях и месторождениях и в использовании несмесимости продуктивных расплавов в качестве инновационного технологического способа переработки труднообогатимого сырья, концентратов и отходов обогащения с селективным извлечением редких металлов и устранением лимитируемых компонентов.

редкометалльные магматогенно-рудные системы, несмесимость и ликвация расплавов, локализация поисков, распределение элементов, экспериментально-технологическая инновация

MAGMATOGENE-LIQUATION MODEL OF RARE METAL ORE FORMATION AND ITS APPLIED IMPLICATIONS

G.B. Melentyev

The article discusses the role of liquation in processes of the rare metal ore genesis and its applied implications: in developments of rational complex of methods concerned with localization of prospecting for rare metal granite pegmatites, in the distribution of rare and limited components in ore fields and deposits, and in the use of productive melts immiscibility as an innovative technological reprocessing method of hard-cleaning raw materials, concentrates and washery refuse with selective extraction of rare metals and removal of limited components.

rare metal magmagine-ore systems, immisibility and liquation of melts, prospecting localization, distribution of elements, experimental and technological innovation

Создатель редкометалльного направления в рудообразовании и минерагении чл.-корр. АН СССР К. А. Власов предложил рассматривать редкие элементы в качестве «меченых атомов» магматогенных процессов, а редкометалльные пегматиты – как фации и фазы гранитных интрузий, которые представляют собой «природные лаборатории», чрезвычайно удобные для изучения проявлений дифференциации и концентрирования рудного вещества. В лабораториях экспериментальной минералогии и петрографии геологических институтов АН СССР (ИГЕМ, ГИ КолФАН и др.) экспериментально была доказана рудоконцентрирующая роль ликвации как механизма дифференциации продуктивных магм (Д. П. Григорьев, Я. И. Ольшанский, Б. Н. Мелентьев, Л. М. Делицын и др. [1, 2]). Согласно этим приоритетным отечественным исследованиям ликвационный распад (расслаивание) расплава при соответствующих Р-Т параметрах осуществляется мгновенно во всем объеме и является необратимым.

Автор исследовал минералого-геохимическую специализацию и пространственно-генетическую зональность редкометалльных пегматитовых полей и других месторождений

гранитовых формаций Средней Азии в условиях хорошей обнаженности в глубоких вертикальных врезях, а также на вскрытых горными выработками и скважинами разведываемых и эксплуатируемых месторождений редкометалльных пегматитах (Восточный Казахстан) и гранитах (Восточное Забайкалье). При этом были выявлены и детально задокументированы примеры как непосредственной связи пегматитов с «материнскими» фациями гранитных интрузий, так и фациальной изменчивости их состава и строения в направлении одноактного внедрения. Впервые установлены «расщепления» зональных жил во фронтальной части инъекций на самостоятельные, согласные или, реже, наиболее продуктивные поперечные жилы-апофизы, представленные контрастными по составу и строению минерально-парагенетическими комплексами соответствующих им зон. Зональное строение редкометалльных пегматитовых инъекций, как и выступов-апофизов в породе кровли редкометалльных фаций гранитов в направлении внедрения, осложняется участковой и ритмичной полосчатостью, причем синхронно с усложнением химического состава этих поликомпонентных остаточных образований. Исключение составляют лишь их непосредственные выклинивания, представленные кварцевыми жилами и штокверками, которые содержат переменные количества альбита, мусковита, железисто-фторидно-литиевых слюд и касситерита. Эти данные полевых исследований не могут быть интерпретированы иначе как проявления внутренних физико-химических и синергетических свойств самих расплавов, структурирование которых в условиях температурного градиента при внедрении, по-видимому, осуществляется самопроизвольно и многократно [1, 2].

Используя эти материалы, а также экспериментальные данные (включая специальное изучение в надликвидусной области состояния и свойств фторидно-литиевых щелочно-алюмосиликатных систем, моделирующих редкометалльные пегматитообразующие расплавы [3]), автор пришел к выводу о проявлениях в них *многопорядковой несмесимости* (immiscibility) в условиях температурного градиента при внедрении, как ведущего фактора дифференциации «сухих» (безводных) расплавов с избыточными компонентами. Разработанная нами принципиально новая *магматогенно-ликвационная* концепция и модель редкометалльного рудообразования обосновывает естественную пространственно-генетическую связь между всеми фациально-инъекционными производными гетерогенных гранитных интрузий (от источника до рудных тел). Это позволяет использовать в прогнозно-поисковых целях все проявления специализации и объемной зональности неравновесных и саморазвивающихся магматогенно-редкометалльных систем, которые отражены в геофизических и геохимических аномалиях, структурах и специфике состава вмещающих пород и, наконец, в рельефе, т. е. представлены геохимическими «концентрами» и конкретными морфоструктурами [4, 5].

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОИСКОВ ВЫСОКОКОМПЛЕКСНОГО РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО СЫРЬЯ

С использованием этих фундаментальных основ и закономерностей локализации редкометалльных оруденений гранитовых формаций разработаны и апробированы на объектах поисков, разведки и эксплуатации, следующие *методы* крупномасштабного и

детального прогнозирования, поисков и перспективной оценки редкометалльных пегматитов и гранитов [5, 6]:

1. Аналитико-графический, позволяющий в жестких системах координат петрохимических диаграмм типов А – $Si-Al-\Sigma y (Na+K+Li+Rb+Cs) - \Sigma \phi (Fe+Ti+Mg+Mn+Ca)$ и Б – $Al-\Sigma \phi (Na+Li)-K$ различать специализацию и изображать пространственно-генетическую зональность естественных гомологических рядов редкометалльных пегматитовых полей, их гипабиссальных (редкометалльных гранитных интрузий) и излившихся аналогов (редкометалльных стекол – «онгонитов»). Рекомендовано их использование в качестве эталонных палеток для прогнозирования ожидаемого типа редкометалльного оруденения по результатам 10–15 силикатных анализов безрудного гранит-пегматит-аплитового комплекса.

2. Вариационно-геохимический, дающий возможность прогнозировать ожидаемые уровни концентрации цезия и тантала в пегматитовых полях с ведущим литиевым оруденением на стадиях поисков и оценки с использованием обратной зависимости содержаний этих элементов от значения $SiO_2/\Sigma R$, характеризующего относительную вязкость пегматитообразующих расплавов, где R – остальные компоненты силикатных анализов пегматитовых тел.

3. Морфоструктурный, используемый для прогнозирования редкометалльных месторождений, не выходящих на дневную поверхность («слепых» и погребенных), для оценки уровней эрозионного среза зональных рудных полей и месторождений и прогнозирования и оценки редкометалльных россыпей.

4. Шлихо-геохимический, рекомендованный для прогнозирования, поисков и перспективной оценки различных типов месторождений пегматитов и гранитов, в том числе по ассоциациям минералов тяжелой фракции, специфике состава касситеритов и вольфрамитов из жильно-штокверковых надэнтрузивных зон и россыпей, наконец, для обнаружения и оценки перспективности самих россыпных месторождений по ассоциациям и специфике состава минералов тяжелой фракции, характерных для тех или иных типов редкометалльных пегматитов и гранитов.

5. Ореольно-геохимический, позволяющий оконтуривать эндогенные геохимические аномалии на поисковых площадях, ранжировать их по степени перспективности на тот или иной тип ожидаемого редкометалльного оруденения с использованием мажоритарных рядов, выявленных в ореолах элементов и локализовать поиски путем интегрированного использования геолого-геохимических карт.

С использованием этих методов на флангах известных пегматитовых полей и эксплуатируемых месторождений были обнаружены жилы-апофизы с промышленным тантал-цезиевым оруденением, участки локализации редкометалльных пегматитов, не вскрытые эрозией и т. д. Наиболее ярким примером реализации этих методов служит обнаружение «слепого» месторождения танталово-оловорудных гранитов Кара-Су [6] на глубине до 300 м под касситеритсодержащим кварцево-жильным штокверком на фланге Калбинской провинции редкометалльных пегматитов (Восточный Казахстан).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЛИМИТИРУЕМЫХ КОМПОНЕНТОВ

Закономерности распределения редких и токсичных компонентов наиболее детально изучены на примерах редкометалльных пегматитовых полей Восточного Казахстана, месторождений редкометалльных уртитов (Ловозеро) и карбонатитов (Ковдор) Кольского региона. Распределение наиболее ценных из них (Cs и Rb, Ta, Ta/Nb) по простиранию существенно литиевых и комплексных редкометалльных пегматитовых полей и восстанию представляющих их жильных инъекций имеет дискретно-эволюционный характер. В разрезах по мощности продуктивных тел подобное распределение осложняется контрастностью содержаний в зонах и элементах их расслоенности. Однако в обоих случаях обнаруживается дискретность в содержаниях указанных редких металлов при накоплении их к флангам полей и месторождений, наиболее удаленных от «материнских» гранитных интрузий, в ряде случаев – до аномально высоких концентраций в апофизах с богатым тантал-цезиевым оруденением, а также в осевых частях жил.

С целью подсчета запасов для Белогорского ГОКа в Восточном Казахстане и редкометалльных уртитовых руд (Ta, Nb, TR) при их паспортизации для Ловозерского ГОКа в Кольском регионе нами составлены минеральные балансы распределения редких элементов (Ta, Nb, Li, Rb, Cs) в различных типах редкометалльных пегматитовых руд. Балансы свидетельствуют о преобладающей их концентрации в профилирующих промышленно-ценных минералах ($\geq 90-95\%$). Такая высокая степень концентрации редких металлов, а в уртитовых рудах – и лимитируемых радиоактивных элементов, является дополнительным доказательством *спонтанного* механизма формирования ими собственных минералообразующих структурных группировок в расплавах. Это подтверждается и результатами выполненных автором экспериментально-технологических исследований.

ЛИКВАЦИЯ ПРОДУКТИВНЫХ РАСПЛАВОВ КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИННОВАЦИЯ

С начала 1980-х гг. нами экспериментально доказаны возможности эффективной переработки с применением ликвационной плавки редкоземельно-ниобиево-фосфатных кор выветривания карбонатитов для получения феррониобия и редкоземельно-стронциево-фосфатного продукта, доизвлечения вольфрама из отходов обогащения вольфрамитовых руд с попутным извлечением в сосуществующие жидкие фазы (слои) тантала и ниобия, висмута и серебра, минеральных концентратов редких щелочных металлов из руд редкометалльных пегматитов и гранитов, коллективных эгириново-титановых концентратов из апатито-нефелиновых руд с извлечением титана и ванадия [7–10].

Продолжается экспериментально-технологическое изучение возможностей извлечения редких щелочных металлов из минеральных концентратов сподумена и других минералов лития, а также цезия с рубидием (из поллуцита и др.) с применением *конверсионной* ликвационной плавки их с фосфогипсом как отходом сернокислотной переработки апатита на фосфатные удобрения. За счет обменных реакций в расплавах между

редкометалльно-щелочными алюмосиликатами и фосфогипсом получены слои – плавленые концентраты сульфатов Li, Cs, Rb и плагиоклаза.

В 1983–1985 гг. ликвидационное направление в пирохимической технологии переработки труднообогатимых и комплексных редкометалльных руд, концентратов и отходов обогащения было оформлено авторскими свидетельствами СССР на изобретения. На двух горно-обогатительных комбинатах, в Восточном Забайкалье и Республике Саха (Якутия), были реализованы авторские рекомендации по извлечению тантала из шлаков оловорудных производств при переработке касситеритовых концентратов из редкометалльных пегматитов и редкометалльно-оловорудных гранитов. В 2011 г. оформлен патент РФ на полезную модель системы термохимической переработки редкометалльного сырья с использованием механизма ликвидационной плавки [10]. В настоящее время это инновационное направление приобретает особое значение в связи с увеличением количества разведанных месторождений труднообогатимого и бедного сырья, прежде всего представленного рудами кор выветривания, включая высококомплексное и богатое редкометалльное сырье супергигантского месторождения Томтор на северо-западе Республики Саха (Якутия) [11].

В настоящее время специалисты ОИВТ РАН в рамках программы Президиума РАН проводят изыскания возможностей извлечения оксидов редких земель и разделения их на группы из различных руд и минеральных концентратов, включая природные, не поддающиеся обогащению традиционными методами, с применением модификаций ликвидационной плавки.

В перспективе механизм ликвидации рудных расплавов может быть использован при разработке «встроенных» в природную среду подземно-дистанционных геотехнологических систем извлечения полезных компонентов как путем имитации металлургических процессов в продуктивных залежах недр, так и непосредственно из рудной части различно специализированных магм с выводом их на дневную поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Г.Б., Делицын Л.М., Мелентьев Б.Н. Ликвация и ее значение в петрологии. В сб. Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации / Под. ред. Коптева-Дворникова. М: Недра, 1972. С. 253–285.
2. Делицын Л.М. Ликвационные явления в магматических системах. М: Геос, 2010. С. 221.
3. Мелентьев Г.Б. Лепидолит-альбитовые пегматиты и их генезис. Автореферат канд. дисс. М: ИМГРЭ, 1972. 20 с.
4. Мелентьев Г.Б. Новая петрологическая модель формирования редкометалльных месторождений гранитовой формации и ее роль в разработке объемно-количественной методики их прогнозирования, поисков и перспективной оценки // Крупномасштабное прогнозирование эндогенных редкометалльных месторождений и их оценка. М.: ИМГРЭ, 1983. С. 7–44.

5. Принципы и методы крупномасштабного прогнозирования редкометалльных месторождений / Под ред. В.В. Булдакова и Г.Б. Мелентьева. М: ИМГРЭ, 1978. С. 178.
6. Мелентьев Г.Б., Степанов А.Е. и др. Оловорудно-редкометалльные месторождения гранитовой формации на флангах пегматитовой провинции, условия их формирования и перспективы поисков. В сб. Крупномасштабное прогнозирование эндогенных редкометалльных месторождений и их оценка. М: ИМГРЭ, 1983. С. 5–30.
7. Мелентьев Г.Б., Давыдов Н.Ф. Перспективы развития пирохимической технологии и связанных с ней минералого-геохимических исследований // Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов / Под редакцией В.И. Ревнивцева. Л: Механобр, 1985. С. 17–34.
8. Мелентьев Г.Б. Фазовая несмесимость в расплавах как инновационный техноэкологический фактор экспрессной переработки природного и техногенного сырья // Материалы Всеросс. научн. конф. с международн. участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», 27-30 ноября 2010 г. ИХТРЭМС КНЦ РАН, Апатиты. Апатиты: КНЦ РАН, 2010. С. 127–129.
9. Мелентьев Г.Б. Система термической переработки редкометалльного сырья Патент РФ №110735, приоритет полезной модели от 28 июня 2011 г.
10. Мелентьев Г.Б. Ликвация – технологическая инновация // Редкие Земли, 2014. № 2. С. 94–95.
11. Мелентьев Г.Б., Самонов А.Е., Толстов А.В. В ожидании промышленного освоения или почему Томтор открывает огромные выгоды инвестору и государству? // Химия и Бизнес, 2013. №№ 5–6. С. 60–64.