

Статистические характеристики минерального состава природных типов пород месторождения Высота-181

Минерал	Природные типы пород								
	Ставролит-кианит-гранатовый сланец			Кианит-гранат- слюдястый сланец			Гранатовый амфиболит		
	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее
Гранат	35,5	13,40	21,50	25,50	13,20	20,35	16,00	12,00	13,8
Ставролит	13,00	0,00	4,73	5,10	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00
Кварц	47,50	31,70	42,00	61,20	41,20	49,67	24,00	8,10	12,2
Плагиоклаз	8,00	0,20	4,13	16,60	0,00	9,77	7,90	2,90	5,00
Мусковит	2,10	0,50	1,50	4,70	0,10	1,97	0,01	0,00	0,0005
Биотит	1,50	0,10	0,63	5,60	0,10	3,12	0,50	0,30	0,40
Кианит	30,00	14,40	22,47	18,70	0,00	11,45	0,00	0,00	0,00
Амфибол	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,35	58,41	67,8
Рудные	4,20	1,20	2,33	1,50	0,20	0,92	0,70	0,00	0,50
Хлорит	0,40	0,10	0,27	0,10	0,10	0,10	0,50	0,10	0,30
Турмалин	0,20	0,00	0,07	0,60	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
Рутил	0,70	0,10	0,40	0,90	0,10	0,45	0,10	0,00	0,00
Карбонат	0,30	0,00	0,13	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10

Таким образом оценка промышленных минералов сегодня должна обязательно включать комплекс минералого-технологических задач по определению дальнейших технологических работ, связанных с опытами по обогащению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. Наука, Спб, 1997. – 581 с.
2. *Лебедева С.И.* Микротвердость минералов. М., 1977, 118 с.
3. Типоморфизм минералов и его практическое значение. Недра, М., 1972, 260 с.

РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ГЕОЛОГО-ПРОГНОЗНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТИПОВ РУД И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Мелентьев Г.Б.

НИЦ «Экология и промышленная энерготехнология»
Объединенного Института высоких температур
(ОИВТ) РАН, г. Москва

Редкометальные месторождения гранитовых формаций, представленные различными типами редкометальных пегматитов и гранитов, являются основными источниками собственно танталового (с ниобием), литиевого и рубидий-цезиевого сырья с сопутствующими бериллиевым и оловорудным. За рубежом редкометальные пегматиты интенсивно разрабатываются как промышленным способом, так и с применением ручной рудоразборки и селективной добычи редкометального и наиболее ценного нерудного сырья [1]. В России в условиях «переходного периода» эксплуатация редкометальных пегматитовых месторождений временно прекращена, а получение собственно танталовых и попутных оловянных концентратов из руд редкометальных гранитов Этыкинского месторождения, предусмотренное программой «ЛИБТОН» Минатома, оказалось нерентабельным из-за низких показателей обогатимости этого сырья, что ранее было доказано практикой эксплуатации подобных же руд Орловским ГОКом (Забайкалье). В то же время в нашей стране десятилетиями не осваиваются крупные разведанные месторождения редкометальных пегматитов на Кольском п-ве, в В. Саянах и ЮВ Тыве, прежде всего, в связи с расположением их в труднодоступных районах. В странах СНГ, с одной стороны, приостановлена деятельность Белогорского ГОКа (В. Казахстан), профилированного в бывшем СССР на выпуск танталовых концентратов с сопутствующими бериллиевыми, оловянными и нерудными (полевошпатовыми, включая к.п.ш., мусковитовыми и кварцевыми), а с другой – так же как и в России, не осваиваются меньшие по прогнозируемым ресурсам, но качественные месторождения редкометальных пегматитов Узбекистана и Украины [1, 2].

Таким образом, проблема прогнозирования, поисков и перспективной оценки новых месторождений редкометального пегматитового сырья представляется весьма актуальной как для России, так и других стран СНГ, прежде всего, на территориях со сложившейся ресурсодобывающей инфраструктурой (Кольский регион, В. Казахстан, Узбекистан, Украина и др.), в перспективных и легкодоступных рудных районах (Карелия) и на территориях нового строительства ж/д магистралей, нефте- и газопроводов, топливно-энергетических

комплексов (юг Сибири, Якутия и др.). В то же время очевидно, что *возможности* обнаружения *новых* редкометальных *месторождений* на дневной поверхности *традиционными* способами ГРП на *освоенных* территориях и, прежде всего, в районах действующих ГОКов *крайне ограничены*. Поэтому эффективность ранних стадий ГРП все в большей степени будет определяться использованием опережающего комплекса методов локального (1:50000 – 1:10000) прогнозирования месторождений и рудных тел, в том числе – не выходящих на дневную поверхность, в пределах известных и новых полей редкометальных пегматитов, а также возможностями оперативной дифференцированной оценки продуктивности пегматитовых проявлений методами малообъемного минералого-технологического картирования.

Фундаментальные основы и рациональный комплекс методов локальной прогнозной оценки перспективности пегматитовых полей

Фундаментальные основы для разработок этих методов применительно к месторождениям редкометальных пегматитов и гранитов были заложены учением К.А. Власова о факторах редкометального пегматитообразования и созданием его последователями принципиально новых их классификаций с использованием *количественных* классификационных признаков и способов в отличие от преимущественно *качественных* классификаций. Известные положения К.А. Власова о пегматитах как фациях и фазах соответствующих гранитных интрузий и дифференциации пегматитообразующих расплавов в процессе внедрения в приоткрывающиеся рудовмещающие трещины пород кровли сыграли роль «спускового механизма» в интенсификации изучения в 1965-85 гг. специалистами ИМГРЭ всех проявлений пространственно-генетической зональности и расслоенности пегматитовых полей, жильных серий и конкретных жил, в обосновании сингенетичности и одноактности редкометальных пегматитовых инъекций [3]. В соответствии с новой концепцией, обоснованной К.А. Власовым, пегматитовый расплав представляет собой не межкристалльную жидкую фазу в понимании А.Е. Ферсмана, а остаточную часть магмы, обособленную и экранируемую породами кровли в апикальных зонах и выступах интрузий. В то же время комплексное пространственно-генетическое изучение магматогенно-рудных систем «гетерогенные гранитные интрузии – безрудные сателлитово-жильные расслоенные фации гранит-аплит-пегматитов – *редкометальные* пегматитовые шпировые и жильные фации (*руды*) – экзоконтактные фации измененных вмещающих пород (эндогенные ореолы и редкометальные слюдиты)» в различных регионах СССР на объективной геолого-структурной, петро-геохимической и количественной минералого-геохимических основах позволили установить и иллюстрировать картографическими и различными аналитико-графическими методами взаимосвязь между всеми фациальными составляющими этих систем, представляющих собой различно специализированные поля или *гомологические ряды* редкометальных гранитных пегматитов [4]. При этом в пределах редкометальных пегматитовых инъекций, образующих жильные серии и поля, фиксируются сходные проявления пространственной (вертикальной) зональности и объемной расслоенности на устойчивые минерально-парагенетические комплексы (зоны) и их ассоциации (типы пегматитов), которые в определенной последовательности сменяют друг друга по мере удаления от источника («материнских» гранитов). В этом же направлении закономерно повышается их редкометальная продуктивность. Все разнообразие изученных к настоящему времени полей и представляющих их типов редкометальных пегматитов, образующих зональные гомологические ряды, а также их гипабиссальных аналогов-редкометальных гранитов, с основными параметрами наиболее ценного танталового оруденения приводятся в авторском многофункциональном классификаторе [4]. При ее составлении использован двойной принцип *количественной* классификации широкого разнообразия редкометальных пегматитовых полей, месторождений, рудных тел, слагающих их зон и минерально-парагенетических комплексов: по преобладающим минералам и ведущей минералого-геохимической специализации (типам оруденения). Очевидно, что различия в последней находят отражение и в типохимических особенностях состава как породообразующих, так и акцессорных минералов, что позволяет использовать эти особенности и их параметры в прогнозно-поисковых целях.

В процессе изучения минералого-геохимической специализации и пространственно-генетической зональности редкометальных пегматитовых полей и других месторождений гранитовых формаций Средней Азии в условиях хорошей обнаженности в глубоких вертикальных врезках, а также вскрытия горными выработками и скважинами разведываемых и эксплуатируемых месторождений редкометальных пегматитов (В. Казахстан) и гранитов (В. Забайкалье), автором 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 внедрения. При этом впервые установлены «расщепления» зональных жил во фронтальной части инъекций на самостоятельные, согласные или, реже, поперечные жилы-апофизы, представленные контрастными по составу и строению минерально-парагенетическими комплексами соответствующих им зон [4].

В направлении внедрения зональное строение редкометальных пегматитовых инъекций, как и выступов-апофиз в породы кровли редкометальных фаций гранитов, осложняется участковой и ритмичной полосчатостью, причем синхронно с усложнением химического состава этих поликомпонентных остаточных обра-

зований – за исключением их непосредственных выклиниваний, представленных кварцевыми жилами и штокверками, содержащими 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.

С использованием этих, а также экспериментальных данных, включая специальное изучение в надлинквидной области состояния и свойств фторидно-литиевых щелочноалюмосиликатных систем, моделирующих редкометалльные пегматитообразующие расплавы, автор пришел к выводу о проявлениях в них *многопорядковой несмесимости* (immiscibility) в условиях температурного градиента при внедрении как ведущего фактора дифференциации расплавов с избыточными компонентами [5, 6, 7]. Разработанная нами принципиально новая *магматогенно-ликвационная* концепция и модель редкометального рудообразования обосновывает естественную пространственно-генетическую связь между всеми фациально-инъекционными производными гетерогенных гранитных интрузий (от источника до рудных тел), что позволяет использовать в прогнозно-поисковых целях все проявления специализации и объемной зональности этих 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.

С использованием этих фундаментальных основ и закономерностей локализации редкометалльных оруденений гранитовых формаций нами разработаны и апробированы на объектах поисков, разведки и эксплуатации следующие *методы* крупномасштабного и детального *прогнозирования, поисков и перспективной оценки* редкометалльных пегматитов и гранитов [4]:

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

– вариационно-геохимический, позволяющий прогнозировать ожидаемые уровни концентрации цезия и тантала в пегматитовых полях с ведущим литиевым орудением на стадиях поисков и оценки с использованием обратной зависимости содержаний этих элементов от величины отношения $SiO_2/\Sigma R$, характеризующего относительную вязкость пегматитообразующих расплавов, где R – остальные компоненты силикатных анализов пегматитовых тел;

– морфоструктурный, используемый для прогнозирования редкометалльных месторождений, не выходящих на дневную поверхность («слепых» и погребенных), оценивать уровни эрозионного среза зональных рудных полей и месторождений и осуществлять прогнозирование и оценку редкометалльных россыпей;

– 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 надинтрузионных зон, по их же составу – из россыпей, и, наконец, для обнаружения и оценки перспективности россыпных месторождений по ассоциациям и специфике состава минералов тяжелой фракции, характерных для тех или иных типов редкометалльных пегматитов и гранитов;

– 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 геохимических карт.

Системный анализ пространственно-генетической связи редкометалльных оруденений с гранитами позволил установить взаимоисключающее формирование промышленных месторождений редкометалльных пегматитов и редкометалльных гранитов в пределах одного «геохимического центра», т.е. соответственно специализированного гранитного плутона, рудного узла или пояса [8]. Эта эмпирическая закономерность объясняется различиями в глубинности формирования редкометалльных пегматитов (на глубине 3,5-6 км) и их гипабиссальных аналогов – редкометалльных гранитов (на глубине 1,5-2 км). Очевидно, что их излившиеся аналоги представлены редкометалльными стеклокристаллическими образованиями или стеклами. В частности, формационный анализ сложно дифференцированного Калба-Нарымского гранитного плутона (В. Казахстан), с центральной, глубоко вскрытой эрозией частью которого связаны поля и промышленные месторождения редкометалльных пегматитов, и его сателитово-лейкогранитового обрамления, с которым, как наименее эродированным, в основном, связаны кварцево-жильно-штокверковые проявления олова и вольфрама (вольфрамит), выполненный нами в 80-е годы, не только подтвердил эту эмпирическую закономерность, но и позволил про-

гнозировать отсутствие перспектив на обнаружение новых промышленно значимых месторождений редкометальных пегматитов в соответствующей морфоструктуре В. Забайкалья, где, наоборот, преобладают разведанные и эксплуатируемые месторождения редкометальных гранитов и проявления излившихся аналогов, аномально обогащенных цезием. С этих позиций в В. Казахстане, в сфере деятельности Белогорского ГОКа, специализированного на тантал, нами выделен целый ряд потенциально перспективных на обнаружение редкометальных пегматитов и гранитов участков и, соответственно, новых поисковых площадей (с учетом взаимного исключения их месторождений, наличия потенциально «продуктивных» морфоструктур и широкого развития в их пределах кварцево- жильно-штокверковых проявлений с касситеритом). Не следует забывать, что мелкие жильные апофизы, обогащенные кварцем и касситеритом, послужили прямым поисковым признаком на крупнейшее в мире литий-цезий-танталовое месторождение Берник-Лейк, представленное крупным полизональным телом редкометального пегматита, продуктивная часть которого оказалась перекрытой рыхлыми отложениями и залегающей под озером. С этих позиций для касситеритов из различных типов редкометальных пегматитов и гранитов, а также других оловорудных формаций, составлена шкала минералого-геохимической индикации искоемых оруденений с использованием данных о содержаниях тантала и ниобия и их соотношений друг с другом – табл. №2 [4].

Методические особенности обогащения редкометальных пегматитовых руд с учетом индивидуальных коэффициентов потерь при выделении мономинеральных фракций на концентрационных столах

Необходимость выделения мономинеральных фракций из малообъемных проб редкометальных пегматитовых руд с использованием их предварительного обогащения на концентрационных столах обусловлена как задачами применения вышеуказанных минералого-геохимических методов для оценки и классификации пегматитов на ранних стадиях ГРП, так и задачами проведения минералого-технологического картирования продуктивных тел на их поздних стадиях, и, наконец, составления поминеральных балансов распределения редких и лимитируемых (с технологических и экологических позиций) микрокомпонентов при подготовке запасов редкометального сырья к утверждению в ГКЗ. Тем самым достигается возможность объективной дифференцированной оценки редкометальных месторождений, представляющих их рудных тел и зон на весь комплекс содержащихся в них полезных компонентов в реально извлекаемых минеральных формах, что позволяет учитывать не только геологические, но и извлекаемые запасы, а также оптимизировать выбор технологических вариантов обогащения руд и минимизировать экологические последствия эксплуатации месторождений. Выделенные технологическим путем мономинеральные фракции не только позволяют оценивать *средний* минеральный *состав* различных типов руд, но и определять *типохимизм* породообразующих и акцессорных минералов, а также, в известной степени, судить о *качестве* будущей товарной продукции, т.е. минеральных концентратах.

В связи с этим в соответствии с разработанной в 50-60-х годах В.В. Ляховичем с сотрудниками методикой промывки проб гранитоидов на столе КЦ-30 был установлен единый для всех минералов тяжелой фракции поправочный коэффициент потерь за счет смыва 1,68 [9]. Затем для акцессорных минералов были определены индивидуальные коэффициенты извлекаемости, определяемые различиями в плотности [10]. Однако очевидно, что эти коэффициенты зависят не только от физических характеристик и свойств минералов, но и от типа пород, из которых они извлекаются.

В связи с этим нами экспериментально на лабораторном столе КЦ-30 были определены поправочные коэффициенты потерь различных минералов тяжелой фракции 4-х типов редкометальных пегматитовых руд, достаточно контрастных по своему составу и качеству [11]. Детально изученные к сводному отчету с подсчетом запасов тантала и сопутствующих полезных компонентов руды Юбилейного месторождения (В. Казахстан), предназначенные для обеспечения сырьем Белогорского ГОКа бывшего Минцветмета СССР, представлены следующими типами редкометального пегматитового сырья:

- Микроклин-кварц-альбитовым с некондиционным Та-Nb-Ве-м оруденением
- Кварц-альбитовым с мусковитом, микроклином и рядовым Та-м оруденением
- Альбит-кварц-сподуменовым с микроклином и рядовым Nb-Ta-м оруденением
- Микроклин-кварц-сподумен-альбитовым с лепидолитом, поллуцитом и комплексным (Li-Cs-Ta) оруденением.

При этом нижняя жила (Единая) в вертикальном разрезе месторождения включает первые два типа редкометального сырья, в то время как верхняя (ж. Юбилейная) – все 4 типа, среди которых основную ценность представляет последний, выполняющий осевую зону в верхних горизонтах центральной части жилы и обособления – на глубине (в плоскости падения) и ее флангах, подобных по составу ж.Единой. По всем типам сырья, представляющим собой устойчивые минерально-парагенетические ассоциации, задокументированные детальным картированием в поверхностных и подземных выработках в виде зон и обособлений, были отобраны пунктирной бороздой частные и затем составлены групповые пробы весом 30-60 кг. После дробления до 0,5 мм групповые пробы сокращались с отбором малых (М – 2 кг) и больших (Б – 15-20 кг) дубликатов, а также навески для химических анализов исходного состава.

Таблица 1

Содержания тантала и ниобия (в вес.%) в касситеритах различных типов месторождений и руд

Формации	Минералого-геохимические специализации месторождений и типы руд	Регион	Ta ₂ O ₅			Nb ₂ O ₅			Ta ₂ O ₅ / Nb ₂ O ₅
			от	до	среднее	от	до	среднее	
Редкометалльные месторождения									
I. Редкометалльные пегматиты	1. Бериллиевые (Ta-Nb-Be) Мк-Аб с Мск	Забайкалье	–	–	2,814	–	–	1,312	2,14
	2. Литиевые Мк-Сп-Аб (незональные)	Вост. Сибирь	0,024	0,08	0,050	0,024	0,07	0,047	1,06
	3. Литий-оловянно-танталовые Мк-Аб с Мск	Казахстан	–	–	0,35	–	–	0,80	0,44
	Li-Ta Мк-Аб с Мск и Сп		–	–	0,31	–	–	0,40	0,78
	Ta-Sn Мск-Мк-Аб		–	–	0,33	–	–	0,35	0,94
	Ta Мк-Аб с Мск		–	–	0,29	–	–	0,32	0,91
	Li-Cs-Ta Аб-Мк со Сп, Пт и Мск	Казахстан	–	–	0,29	–	–	0,32	0,91
	4. Комплексные редкометалльные (Li-Cs-Ta) Мк-Аб с Мск, Сп и Лп (зональные)		–	–	2,11	0,156	0,495	0,325	6,1-7,7 (6,5)
	Ta-Nb-Be Мк-Аб с Мск		1,20	3,026	2,327	–	–	0,24	9,70
	Ta Кв-Аб		–	–	2,12	0,227	0,313	0,28	5,9-10,6 (7,57)
Ta-Li Аб-Сп-Кв с Мск	2,408	1,865	2,12	0,227	0,313	0,28	5,9-10,6 (7,57)		
Li-Cs-Ta Сп-Кв-Аб с Мск, Лп, Пл	2,057	2,912	2,34	0,24	0,29	0,26	8,6-10,1 (9,00)		
5. Комплексные редкометалльные () Мк-Сп-Аб (незональные)	Вост. Сибирь	–	–	1,39	0,63	1,40	0,94	1,5	
Li Мк-Сп-Аб		1,25	1,80	1,70	0,60	1,0	0,85	2	
Li-Ta Мк-Сп-Аб		1,30	2,20	2,82	0,50	0,85	0,70	4	
Li-Cs-Ta Мк-Сп-Аб		2,30	4,03	3,20	–	–	0,80	4	
Ta Аб и Мск	–	–	1,27	–	–	0,21	0,4-1,7 (1,05)		
6. Фтор-тантал-литиевые Лп-Фб (со Сп и без Сп)	Средняя Азия	0,25	2,30	1,27	–	–	0,21	0,4-1,7 (1,05)	
II. Редкометалльные граниты	1. Фтор-тантал-литиевые Ам-Аб с Лп	Забайкалье	1,0	4,0	2,5	–	–	0,91	0,5-5 (2,75)
	2. Фосфор-фтор-тантал-оловянно-титиевые Мк-Аб с Li-слодами	Северо-Восток	–	–	0,75	–	–	3,75	0,20
Оловорудные месторождения									
III. Пневмато-гидротермальные жильные и штокверковые (надинтрузивные) образования	1. Полевошпат-касситеритовые	Вост. Сибирь	0,12	0,62	0,347	0,187	0,553	0,362	0,93
	2. Кварц-касситеритовые	Забайкалье	–	–	0,0170	0,050	0,290	0,088	0,1932
		Вост. Сибирь	0,001	0,050	0,0170	0,050	0,290	0,088	0,1932
		Забайкалье	–	–	0,0243	0,080	0,635	0,2667	0,091
		Приморье	0,018	0,035	0,052	0,005	0,177	0,107	0,486
		Якутия	0,012	0,12	0,052	0,005	0,177	0,107	0,486
		Чукотка	н/о	0,018	0,005	0,002	0,087	0,038	0,133
		Ц. Казахстан	0,10	0,31	0,16	0,080	0,92	0,434	0,3687
		Средняя Азия	–	–	0,52	–	–	1,00	0,052
	среднее для типа	0,001	0,31	0,051	0,002	0,92	0,301	0,17	
	3. Топаз-касситеритовые	Вост. Сибирь	0,047	0,053	0,05	1,02	1,60	0,21	0,04
	4. Силикатно- и сульфидно-касситеритовые	Забайкалье	–	–	0,04	–	–	0,0188	2,13
		Вост. Сибирь	–	–	0,04	–	–	0,0188	2,13
Забайкалье	–	–	0,04	–	–	0,0188	2,13		

Примечание. Данные по оловорудным формациям заимствованы у И.Е. Максимюк, по комплексным редкометалльным пегматитам Вост. Сибири у Ю.И. Филипповой, остальные – авторские; стрелками показано направление зональности пегматитовых инъекций. Отношение Ta₂O₅/Nb₂O₅ в скобках – среднее.

Технологическая обработка отобранных дубликатов проб проводилась в лаборатории аксессуарных минералов параллельно по двум схемам. Большие дубликаты проб обрабатывались по методике, разработанной для изучения аксессуарных минералов гранитов, включающей промывку проб на концентрационном столе [11]. При обработке проб на столе получают четыре продукта: концентрат (серый шлик), промежуточный продукт, хвосты и шламы. Промежуточный продукт промывали еще раз, и в результате обработки он распределялся между концентратом и хвостами. Чтобы избежать потерь извлеченных редкометалльных и аксессуарных минералов концентрат перечистным операциям на столе не подвергали, а разделяли на тяжелую и легкую фракции в бромформе. Тяжелую фракцию шлика разделяли на 7-8 электромагнитных фракций. При обработке этих проб поддерживались постоянными следующие параметры работы стола: а) напор воды; б) крупность обрабатываемых проб (0,5 мм); в) выход концентрата 10-11% от веса промываемой пробы; г) ситовая характеристика (одинаковая дисперсность) обрабатываемых проб. Среднее ее значение составляло: класс -0,5+0,25 – 44,3%; класс -0,25+0,1 – 25,3%; класс -0,1+0,007 – 19,6%; класс -0,007 – 10,8%. Малые дубликаты групповых проб технологически обрабатывали по упрощенной схеме: их не промывали на концентрационном столе, а после обесшламливания (до крупности минералов 0,07 мм) разделяли в бромформе на тяжелую и легкую фракции, с последующим выделением электромагнитных фракций.

Количественно-минералогический анализ тяжелой фракции проводился под бинакулярным микроскопом в дорожках из 100-500, иногда 1000 зерен отдельно по каждому классу крупности (+0,25; -0,25 мм) всех электромагнитных фракций. При расчете исходного количества аксессуарных минералов в пробах учитывалась их плотность (удельный вес). Чтобы исключить случайные ошибки в определении состава и количества аксессуарных минералов редкометалльных пегматитов, подсчет их во всех пробах, как и технологическая обработка проб, проводился одним исследователем.

Поправочные коэффициенты потерь (K) аксессуарных минералов при промывке проб на столе КЦ-30 рассчитывали как отношения их концентраций в малой (М) и большой (Б) пробах, т.е. в непромытой и в промытой частях групповой пробы (11).

Для расчета максимального процента содержаний редкометалльных минералов в шламах используется формула:

$$Q = c p \beta,$$

где Q – содержание минерала в шламе (%);

c – величина отношений содержаний элемента в шламе к его концентрации в пробе;

p – количество шлама в пробе (%);

β – доля содержания элемента в пробе за счет данного редкометалльного минерала.

В этой формуле значения всех величин являются среднеарифметическими, т.е. полученными по данным нескольких проб. В расчетах использовались данные, полученные при составлении балансов распределения редких элементов по минералам, слагающим различные типы редкометалльного сырья. Установлено, что от общего количества элементов, содержащихся в пробах, в колумбит-танталите концентрируется 72% тантала и 76% ниобия, в микролите – 90% тантала, в касситерите – 82% олова и в сподумене – 83% лития. Расчетами показано, что от общего количества редкометалльных минералов в пробах шлама содержат: касситерита – 3,4%, колумбит-танталита – 3,6%, микролита – 5,3%, сподумена – 6,2%, т.е. при отмучивании проб количество переходящих в шламы минералов зависит в основном от их удельного веса. В то же время среднее содержание редкометалльных минералов в шламах изученных пегматитовых проб составляет 4,6%, от общего их количества в породе, что весьма близко к количеству аксессуарных минералов шламах гранитоидных проб 4,4%, полученному экспериментально В.В. Ляховичем (10).

Учитывая процентное содержание того или иного минерала в шламе, были рассчитаны поправочные коэффициенты общих потерь отдельно для каждого аксессуарного минерала при технологической обработке проб редкометалльных пегматитов (табл. 3). Расчет проводился по формуле

$$N = 100K/100 - Q,$$

где N – общий поправочный коэффициент потерь минерала при технологической обработке пробы;

K – поправочный коэффициент, учитывающий потери минерала в хвосте пробы;

Q – содержание минерала в шламе (%).

Таблица 2

Зависимость общего поправочного коэффициента потерь аксессуарных минералов от их удельного веса при технологической обработке проб редкометалльных пегматитов

Минералы	Удельный вес, г/см ³	Общий поправочный коэффициент потерь (N)	N + λ0,05 ^{х)}
Касситерит	6,7	1,05	1,12
Колумбит-танталит	6,2	1,06	1,15
Микролит	5,1	1,08	1,18
Циркон + циртолит	4,4	1,22	1,37
Гранат	3,8	1,30	1,41
Литиофиллит-сиклерит	3,3	1,90	2,36
Апатит	3,21	1,74	1,94
Сподумен	3,16	1,64; 3,82	1,96; 4,26
Турмалин	3,11	1,90	2,11
Амблигонит-монтебразит	2,98	2,57	2,69
Средний		1,55	1,73

^{х)}Общий поправочный коэффициент потерь, рассчитанный по максимальному значению доверительного интервала, с доверительной вероятностью 0,95.

Приведенные данные подтверждают отмечавшуюся ранее многими исследователями зависимость коэффициентов потерь аксессуарных минералов от их плотности: с ее уменьшением возрастают их коэффициенты потерь (см. табл. 2). Особое положение при этом занимает сподумен, для которого наблюдается прямая зависимость коэффициента потерь от содержания минерала в пробе. При небольших содержаниях сподумена (до 300 г/т) коэффициент потерь его равен 1,64, т.е. соизмерим с аналогичными коэффициентами других аксессуарных минералов, характеризующихся близкими удельными весами. Но когда количество сподумена достигает уровня породообразующего минерала, коэффициент его потерь резко возрастает (до 3,8).

График (рис. 1) зависимости средних значений коэффициентов потерь (Ñ) аксессуарных минералов от их плотности (d) построен по данным табл. 2. Преобладающее количество фигуративных точек совпадает с

кривой или имеет весьма незначительный разброс, кроме фигуративной точки сподумена (1) при высоких его содержаниях в пробах. На графике также приведена кривая зависимости между максимальными значениями доверительно интервала средних коэффициентов потерь ($\bar{N} + \lambda 0,05$) отдельных минералов и их удельного веса (d), которая характеризуется несколько более значительной амплитудой отклонений фигуративных точек по сравнению с первой кривой. Кривые очень близки по своей форме и весьма наглядно подтверждают закономерное увеличение коэффициентов потерь аксессуарных минералов с уменьшением их плотности [11].

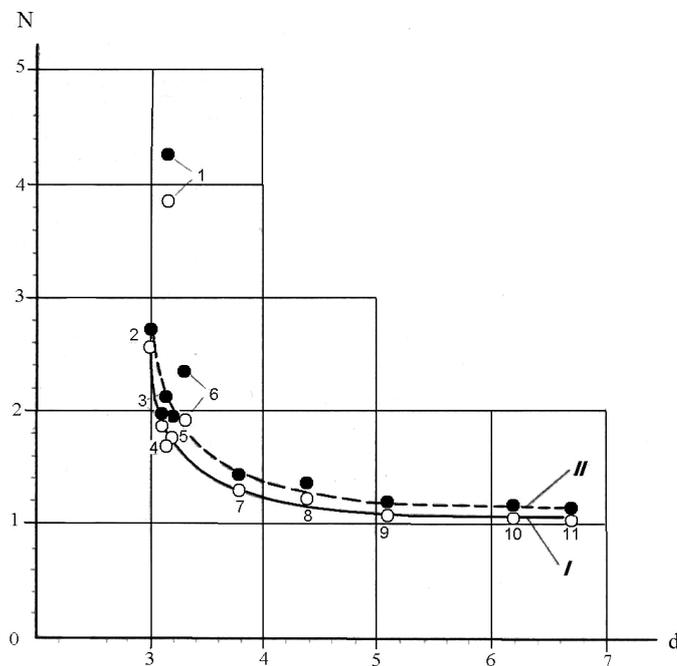


Рис. 1. Зависимость поправочных коэффициентов потерь (N) редкометалльных и других аксессуарных минералов от их плотности (d). I – средние арифметические значения поправочных коэффициентов потерь (N), II – максимальные значения их доверительного интервала ($N + \lambda 0,05$):

1 – сподумен (при содержаниях в породе больше 300 г/т); 2 – амблигонит-монтебразит; 3 – турмалин; 4 – сподумен (при содержаниях в породе меньше 300 г/т); 5 – апатит; 6 – литиофиллит-сиклерит; 7 – гранат; 8 – циркон+циртолит; 9 – микролит; 10 – колумбит-танталит; 11 – касситерит.

Очевидно, что данные табл.2 и рис. 1 могут быть использованы для определения коэффициентов потерь других аксессуарных минералов по величине их плотности при обработке проб различного пегматитового сырья. Приведенная методика и результаты выполненного исследования могут быть использованы также при проведении опытно-методических работ по комплексной оценке перспективности россыпей ближнего сноса на всех стадиях ГРР.

Особо важное значение имеет учет «технологических» потерь редкометалльных и прочих аксессуарных минералов при составлении поминеральных балансов распределения редких металлов в различных типах редкометалльных руд при подсчете их запасов в промышленных месторождениях. Очевидно, что без учета индивидуальной потери каждого редкометалльного минерала, расхождение результатов подсчета запасов, проведенных обычным способом (по данным химических анализов) и «по минералу» может быть наибольшим для лития (в 2-4 раза) и наименьшим – для тантала и олова (см. рис. 1).

Разработанный автором комплекс методов локального прогнозирования, поисков и перспективной оценки редкометалльных пегматитовых полей был апробирован на эталонных месторождениях, их флангах, глубоких горизонтах и на новых площадях. В результате, в процессе выполнения договорных работ с геологоразведочными организациями и ГОКами в Узбекистане, Киргизии, В. Казахстане, В. Забайкалье и Приморье, им были переданы практические рекомендации, позволившие внести существенные коррективы в направления и методику работ. Разработка Атласа «Структурно-геоморфологический метод прогнозирования редкометалльных месторождений» была отмечена Дипломом 2-й степени на ВДНХ, а ее авторы (Д.Я. Айздердзис, Г.Б. Мелентьев, Л.И. Веремеева и др.) – награждены серебряными и бронзовыми медалями. Совмещенное использование аналитико-графического, морфоструктурного и шлихо-геохимического методов оказалось наиболее эффективным и обусловило возможности выдачи опережающих рекомендаций на обнаружение и комплексную оценку новых типов редкометалльного сырья, включая обнаружение поллуцитсодержащих жил, новых, не выходящих на дневную поверхность жильных серий редкометалльных пегматитов в пределах

опущенных неотектонических блоков (Узбекистан и др.) и нетрадиционного для Калбинской пегматитовой провинции (В. Казахстан) месторождения оловорудно-редкометалльных гранитов (Карасу) на юго-восточном фланге этой провинции, наличие которых было подтверждено бурением (6). Рекомендации на поиски месторождений редкометалльных гранитов как нового типа сырья для Белогорского ГОКа в этой провинции впервые были разработаны для ее наименее эродированного обрамления на ЮВ и СЗ флангах, а также для российской территории в высокогорной части Алтая.

Эффективность авторской методики минералого-геохимического опробования и картирования редкометалльных пегматитовых полей и месторождений, сопровождающегося изучением их обогатимости с выделением и анализом мономинеральных фракций породообразующих и акцессорных минералов, была подтверждена не только использованием ее в прогнозно-поисковых целях, но и при подсчетах извлекаемых запасов и переоценке сырья эксплуатируемых месторождений на весь комплекс содержащихся в них полезных и лимитируемых с технологических и экологических позиций компонентов с составлением поминеральных балансов их распределения. В частности, была установлена обогащенность так называемых «альбит-сподуменовых» пегматитов в верхних горизонтах жильных серий мелковкрапленным микроклином до 15-20%, что позволило утвердить их в качестве микроклин-сподумен-альбитового типа, обогащенного танталом и цезием (с рубидием), переоценить «керамические» пегматиты Лалабулакского пегматитового поля в Узбекистане в качестве крупного промышленного месторождения редкометалльно-керамического сырья, выявить существенные различия в потенциальной промышленной ценности месторождений лепидолит-альбитовых пегматитов, остающихся неизученными на глубину в Приморье, Узбекистане и на Памире и т.д.

В настоящее время применение авторских методов перспективной оценки новых площадей и объектов на нескрытые эрозией или погребенные месторождения редкометалльных пегматитов и гранитов, в том числе – путем разбраковки кварцево-жильно-штокверковых проявлений по составу касситерита, может быть рекомендовано в первую очередь для выделенных поисковых площадей в районах возобновляемой деятельности Белогорского ГОКа в Казахстане, легкодоступных объектов поисков и оценки редкометалльного сырья в Узбекистане, Таджикистане (Гиссар, Памир), на Украине (Сорокинская зона и др.) и, возможно, в Киргизии, т.е. в южных государствах СНГ. В России наиболее перспективным представляется проведение подобных работ в Карелии и Кольском регионе, где рекомендуются доизучение и опытно-промышленная эксплуатация проявлений танталсодержащих и разведанных комплексных редкометалльных пегматитов на СЗ фланге Колмозеро-Вороньегундровской жильной зоны, а также фторидно-иттриево-танталовых пегматоидных фаций щелочно-гранитных интрузий в Кейвах и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Г.Б. Редкие металлы как «витамины» промышленности: состояние и перспективы. В сб.: Прикладная геохимия, вып. 7, кн. 2 (к 100-летию К.А. Власова). М.: ФГУП ИМГРЭ, 2005, с. 251-262.
2. Мелентьев Г.Б., Торицова М.В., Зубков А.А., Линде Т.П., Делицын Л.М. Перспективы организации производства редких металлов в государствах Средней Азии за счет комплексной переработки и использования природного и техногенного сырья инновационными горно-технологическими предприятиями. В сб. Материалы V Конгресса обогатителей стран СНГ, 23-25 марта 2005 г., г. Москва. Том 3, с. 110-120. М.: изд. МИСИС-Альтекс, 2005.
3. Мелентьев Г.Б. Творческое наследие К.А. Власова в редкометалльном пегматитообразовании и его прикладные следствия. В сб.: Прикладная геохимия, вып. 7, кн. 2 (к 100-летию К.А. Власова). М.: ФГУП ИМГРЭ, 2005, с. 307-324.
4. Сб. Принципы и методы крупномасштабного прогнозирования редкометалльных месторождений. Ред. В.В. Булдаков, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1978. – С. 178.
5. Мелентьев Г.Б., Степанов А.Е., Марьянова Н.П., Маслов В.А. 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. Ред. В.В. Иванов, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1983, с. 5-30.
6. 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. В сб. Локальное прогнозирование и перспективная оценка эндогенных сырьевых источников редких металлов. Ред. В.В. Иванов, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1987, с. 7-44.
7. Мелентьев Г.Б., Делицын Л.М., Мелентьев Б.Н. Ликвация расплавов и ее значение в петрологии. В кн.: Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации. Ред. В.С. Коптев-Дворников. М.: Недра, 1972, с. 253-285.
8. Мелентьев Г.Б., Айздердзис Д.Я., Марьянова Н.П. и др. Пространственно-генетические взаимоотношения и особенности состава редкометалльных, оловорудных и вольфрамовых проявлений гранитного магматизма как основа прогнозирования и поисков новых месторождений в горнорудных провинциях. В сб.: Тез. докл. III Всесоюз. пегматитового совещ., 8-10 июня 1982 г., Иркутск. Изд. ГЕОХИ СО АН СССР, 1982, с. 197-199.
9. Ляхович В.В. Рациональная методика извлечения акцессорных минералов из гранитоидов. М.: Недра, 1956.
10. Ляхович В.В. О потерях, сопровождающих извлечение акцессорных минералов из изверженных горных пород. Труды ИМГРЭ, вып. 18. М.: изд. АН СССР, 1963.
11. Акелин Н.А., Мелентьев Г.Б., Пиккат-Ордынская А.П. и др. Учет потерь редкометалльных и других акцессорных минералов при обогащении пегматитовых руд на концентрационном столе КЦ-30. Экспресс-информация ВИЭМС Мингос СССР «Лабораторные и технологические исследования и методы обогащения минерального сырья», № 5, 1975, с. 1-11.