Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г.В.Плеханова,
1987, т. 112

552.321.6+553.08

ПЕТРОМИНЕРАГЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ВОПРОСЫ ТИПИЗАЦИИ ДРЕВНИХ ГИПЕРБАЗИТОВ

Г.П.ШАБАЛДИН

Сравнительное изучение существенно гипербазитовых (ультрамафитовых) плексов докембрия и палеозоя представляется рациональным методом познания эволюции магматизма и метаморфизма в истории формирования и преобразования земной коры. Важность познавательного – общегеологического и петрологического – значения таких исследований дополняется практической актуальностью, поскольку с древними ультрамафитами и их разнообразными метаморфическими производными связаны различные полезные ископаемые: черные, цветные и драгоценные металлы, амфиболовые и серпентиновые асбесты, тальк, брезит, огнеупоры, ювелирные, поделочные камни и др. [2, 4, 6, 10, 11,

Петроминерагенический анализ магматических, метаморфических и рудных формаций (ПМА) в их совокупности и многообразии связей является, по мнению автора, новым перспективным направлением решения основных проблем на стыке петрологии и минерагении. К ним относится, в частности, выбор оптимальной стратегии (принципов) и тактики (критериев) прогнозирования промышленных типов месторождений, включая гетерогенные и полиформационные, для которых еще не разработаны надежные основы типизации и прогнозно-минерагенической оценки.

Выдающийся петролог и знаток рудных месторождений А.Н.Заварицкий, обобщив многолетний опыт петрохимии, пришел к выводу о том, что сравнительное изучение химизма горных пород и их ассоциаций (провинций, формаций) – необходимая составная часть в решении основных проблем петрологии и металлогении, а рациональные методы сравнения и сопоставления химических особенностей естественных ассоциаций пород могут и должны явиться одним из главных средств при установлении обобщающих понятий – типов петрографических провинций, формаций, родственных групп или ветвей [3].

Полностью разделяя этот фундаментальный вывод и развивая его в ПМА, должно вместе с тем отметить, что предложенный А.Н.Заварицким метод и диаграмма оказались практически непригодными для петрологического и формационно-минерагенического анализа существенно гипербазитовых ассоциаций. В составе преобладающих пород последних отсутствуют алюмосиликаты, в связи чем не информативны две главные числовые характеристики a и c, а объединение магния и железа (с добавлением кальция или алюминия) в характерис-

тике b приводит к скучиванию фигуративных точек в узком мафическом поле диаграммы. Это не позволяет выявлять и графически анализировать важные для петроминерагенического анализа соотношения и связи перечисленных петрогенных элементов ультрамафитов, не говоря уже о рудных и примесных, которые не учитываются (как и в других традиционных методах петрохимии) или искусственно, в основном по валентности, объединяются с петрогенными. Поэтому для ПМА, предполагающего выявление и изучение связей типоморфных рудных элементов с петрогенными, а также степени и характера - природы трансформации этих связей в гетерогенных объектах, традиционные петрохимические методы, включая модифицированный Н.Д.Соболевым метод и диаграмму А.Н.Заварицкого, практически неэффективны.

Не обрели всеобщего признания и некоторые петрохимические коэффициенты и отношения элементов (число Хесса, индексы дифференциации, кристаллизации и др.), поскольку все более отчетливо выявляются различия в химизме и связях петрогенных и рудных элементов даже одноименных ультрамафитов различной тектонической позиции, формационной принадлежности, возраста и минерагении [6, 7, 10-14 и др.]. Применительно к древним - раннедокембрийским и некоторым более "молодым" ультрамафитовым комплексам, подверженным интенсивным, иногда полиметаморфическим преобразованиям, химизм пород (включая широко развитые в большинстве массивов серпентиниты) представляется на современном уровне их изученности более представительным и универсальным признаком для формационной корреляции и ПМА по сравнению с валовым химизмом минералов, сосуществующих в ультрамафитах. Сопоставление валового химического состава минералов без учета важных для петроминерагенического анализа особенностей их конституции и анатомии приводит к некорректным, часто противоречивым термодинамическим оценкам параметров и факторов петро- и рудогенеза, даже при локальном (внутрипородном) перераспределении петрогенных и рудных элементов в метаультрамафитах. Химизм самих пород, не подверженных существенным аллохимическим преобразованиям, может служить более надежным фактическим материалом для ПМА, естественно, при условии геолого-петрографического контроля и с учетом минералого-геохимических и других данных по рудным парагенетическим ассоциациям [7, 10-12 и др.].

При неравномерной и недостаточной изученности древних ультрамафитов, формационно-минерагеническая типизация которых теоретически не разработана и не удовлетворяет запросам геологической практики и локального прогнозирования, необходимо выявление таких существенных, устойчивых связей между геологическими и рудными формациями, которые адекватно отражают главные факторы петро- и рудогенеза в конкретных структурно-формационных зонах и комплексах пород [2, 6, 8, 10]. Примеры успешного использования корреляционного и факторного анализа на основе метода главных компонент (МГК) при изучении и прогнозно-минерагенической оценке различных, в том числе древних ультрамафитовых комплексов [6, 10-14 и др.], демонстрируют преимущества многомерных методов обработки и анализа петрогеохимической информации, которые позволяют объективно и статистически достоверно выбирать

наиболее показательные - индикаторные характеристики, отражающие закономерные связи элементов и факторы петрорудогенеза. Структура парных корреляционных и обобщенных связей петрогенных и рудных элементов, выявляемая ПК, определяется совокупным влиянием наиболее существенных, но непосредственно не измеряемых величин - главных факторов, выступающих в роли причин при содержательной интерпретации. Этим обусловлена принципиальная возможность выявления причинно-следственных связей и создания эвристически ценных петроминерагенических моделей сложных, в том числе гетерогенных систем и объектов - комплексов пород, путем привлечения производных различных процессов (магматизма, изо- и аллохимического метаморфизма): соответствующих пород. Так, в частности, серпентиниты и другие метаморфиты, связанные с гипербазитами, обычно игнорируются при формационном анализе ультрамафитовых комплексов и разработке критериев их рудоносности, исходя из представлений о доминирующей роли процессов дифференциации практически безводных расплавов. Такие представления и связанные с ними пересчеты химических составов пород на "сухое" вещество, допустимые в некоторых идеализированных петрологических моделях, нельзя признать обоснованными и пригодными для формационно-минерагенических исследований, поскольку они не дают верной информации о составе реальных пород, массивов, комплексов и самих формаций, искажая фактический материал - необходимую основу корректных обобщений при сравнении и типизации конкретных объектов.

С учетом отмеченных методических особенностей ПМА в отношении ультрамафитовых комплексов при отборе и обработке обширной петрохимической информации были учтены не только современные требования к ее представительности по сумме компонентов (100 ± 1 %), но и существенные для решения поставленных задач дополнительные условия: данные по содержанию в породах главных рудных элементов ультрамафитов - хрома и никеля, а также степени гидратации - серпентинизации. Геолого-петрографические данные о тектонической позиции, структурно-вещественных особенностях комплексов, массивов и преобладающих в них пород (в частности, контроль характера метаморфизма), дополненные минерагеническими данными о видах и масштабах рудоносности [1, 2, 6-8], были учтены при формировании выборок и при расчетах средних составов, представленных в таблице [10-12]. Принадлежность сопоставляемых комплексов к гипербазитовой формации принималась по данным наиболее детальных геолого-петрографических исследований тех из них (в частности, аллареченского и его вероятных аналогов на Карело-Кольском кратоне), для которых еще не достигнуто полной определенности в формационной типизации [2, 6, 10-12]. Это частично относится и к другим ультрамафитам, представляющим раннедокембрийские, в основном позднеархейские комплексы Балтийского, Украинского и Канадского щитов, а также Прибайкалья (Идарский комплекс южного обрамления Сибирской платформы).

В выборке Н наряду с промышленно-никеленосными комплексами (аллареченским, пояса Томпсон Канады) объединены близкие им по вещественному составу, геоструктурной позиции и минерагении ультрамафиты, не содержащие

Петрохимическая корреляция и структура главных компонент (ГК I, ГК II) никеленосных (Н), хромитоносных (Х) и асбестоносных (А1, А2) ультрамафитов

Переменные	Выборочные статистические оценки													Факторные нагрузки (x100)							
	средних $\bar{x}$ и стандартов S								различий по средним			различий по дисперсиям		ГК I				ГК II			
	Н (23/155)		Х (22/327)		А1 (29/425)		А2 (10/481)[1]		Н-А1	Н-Х	А1-Х	А1-А2	Х-А2	Н	А1	Х	А2	Н	А1	Х	А2
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	x	s	2,01/2,0	2,02/2,05	2,01/2,0	2,09/2,21	2,04/2,38[2]	39	30	35	41	18	22	25	20[3]
SiO_2	37,6	2,2	38,4	2,7	39,1	2,2	37,3	0,99	2,44/н[4]	н/н	н/н	3,48/4,84	н/7,29	+75	-56	-80	(-)[4]	(-)	(+)	(+)	(-)
TiO_2	0,21	0,18	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,06	6,05/10,1	5,98/10,6	н/н	н/2,25	н/н	+85	(+)	(+)	(+)	(+)	+57	+68	+84
Al_2O_3	2,1	1,3	0,93	0,35	0,91	0,58	0,73	0,39	4,08/5,02	4,16/13,8	н/2,75	н/2,21	н/н	(+)	(+)	(-)	(-)	+58	+63	+73	(+)
Fe_2O_3	8,7	1,8	3,9	1,6	3,9	1,8	5,1	0,97	5,57/н	5,52/н	н/н	2,77/2,56	2,58/2,56	(-)	+86	+90	+74	+72	(+)	(-)	(-)
FeO	4,9	2,3	4,4	1,7	4,0	1,9	2,5	0,96	н/н	н/н	н/н	3,37/3,61	н/2,89	+83	-68	-91	-81	(-)	+58	(+)	(+)
MnO	0,15	0,04	0,11	0,03	0,12	0,05	0,09	0,02	2,40/н	3,81/н	н/2,78	н/6,25	2,22/н	+80	-48	(-)	-64	(+)	(-)	(+)	(-)
MgO	35,8	3,3	42,0	2,7	41,7	3,3	40,5	1,6	6,40/н	6,91/н	н/н	н/4,52	н/2,85	-46	-79	-66	-68	-78	(-)	-54	(-)
CaO	1,1	0,7	0,52	0,38	0,36	0,29	0,36	0,21	4,76/5,83	3,47/3,39	н/н	н/н	н/3,27	+77	-50	(-)	-60	(+)	+50	+62	+61
Na_2O	0,16	0,11	0,08	0,04	0,08	0,09	0,11	0,05	2,82/н	3,27/7,56	н/5,1	н/2,78	н/14,1	+82	(+)	+53	-80	(-)	+51	+66	(-)
K_2O	0,14	0,12	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	4,21/9,0	3,87/16,0	н/н	н/4,0	н/н	+77	(-)	(+)	(-)	(-)	+54	+80	+85
H_2O^+	9,5	3,8	8,9	4,5	8,9	4,2	12,6	1,84	н/н	н/н	н/н	3,83/5,44	3,32/6,25	-64	+85	+97	+86	+44	-40	(+)	
Cr_2O_3	0,48	0,22	0,49	0,32	0,44	0,22	0,38	0,07	н/н	н/2,11	н/2,12	н/9,88	н/20,9	+59	(+)	(-)	-78	+41	+68	-50	
Ni	0,21	0,12	0,18	0,09	0,22	0,04	0,22	0,02	н/9,0	н/2,25	2,15/4,0	н/4,0	2,2/16,0	(-)	-55	(-)		(+)		(-)	
Сумма	99,05		99,99		99,40		99,99														

1) В скобках в числителе – объем выборки усредненных составов пород, в знаменателе – число анализов.

2) В числителе и знаменателе критические значения соответственно критериев Стьюдента t и Фишера F на уровне значимости 0,05.

3) Вклад в общую дисперсию, %.

4) „н" – статистически незначимые различия; и „(-)" факторные нагрузки.

крупных концентраций сульфидов никеля, но обладающие определенным геохимическим родством с никеленосными [6, II-I4]. Выборка Х объединяет хромитоносные гипербазиты позднего докембрия – раннего палеозоя Урала (Кемпирсайский, Войкаро-Сыньинский, Рай-Изский массивы) и включает для сравнения формационные средние дунитов и гарцбургитов альпинотипной – офиолитовой ассоциации континентов, обладающей на уровне одноименных пород различных регионов большим сходством (вплоть до полной аналогии) минерального и химического состава [I, 6, 7, I2]. Выборка А1 представлена древними асбестоносными (антофиллит, хризотил, тремолит) ультрамафитами Карелии, Кольского полуострова, Финляндии, Южной Африки, Урала и Мугоджар, Восточного Саяна, Тувы и Байкало-Муйского пояса, возраст которых (от раннего до позднего докембрия) частично дискуссионен, равно как и принадлежность некоторых комплексов кратонов к типичной гипербазитовой (дунит-перидотитовой) формации [2, 4, 7, I0, I3, I4]. Выборка А2 сформирована на основе хризотил-асбестоносных серпентинитов и серпентинизированных гипербазитов Киембайского массива – типичного представителя среднепалеозойских альпинотипных комплексов Уралид, и дополнена формационными средними дунитов, гарцбургитов и серпентинитов этого региона в целом [I, 4, I0].

Анализ сводной таблицы с учетом парных корреляционных связей [I0-I2] и минералогических, в том числе микрозондовых, исследований [6, II, I4 и др.] позволяет заключить, что ультрамафиты выборки Н существенно отличаются от хромитоносных и асбестоносных альпинотипных гипербазитов Урала (и их гомологов других складчатых областей фанерозоя) более высоким содержанием титана, глинозема, оксидов железа (II), кальция и щелочей в основном за счет пониженной магнезиальности. Значимые различия выявляются и в дисперсиях титана, алюминия, кальция, щелочей, хрома и никеля, причем дисперсии большинства элементов, кроме хрома, выше в выборке Н, чем в выборке Х, что вполне согласуется с минерагеническим и петрологическим своеобразием этих комплексов. Эти особенности химизма наиболее выразительно проявлены в структуре факторных нагрузок петрогенных и рудных элементов двух главных компонент (см. таблицу). В сочетании с отмеченными нами ранее [I0-I4 и др.] отличиями ультрамафитов выборки Н от типичных альпинотипных гипербазитов офиолитовых ассоциаций по геоструктурной позиции, составу и минерагении, результаты проведенного анализа подтверждают теоретическую и практическую целесообразность выделения кратонотипных ультрамафитов в ранг самостоятельной формации. Главным фактором сопряженного петрологического и минерагенического своеобразия кратонотипных комплексов является высокая степень плавления мантийного вещества и магматического фракционирования, что существенно отличает их и в генетическом аспекте от типичных дунит-гарцбургитовых ассоциаций, для которых наиболее вероятна реститовая природа [I, 7, II-I4 и др.].

На примере сравнительного петрохимического анализа древних ультрамафитов демонстрируются преимущества и возможности развиваемого направления, которое снимает, по мнению автора, кажущееся противоречие вещественного, структурно-вещественного (конституционного) и генетического подходов к вы-

делению и типизации формаций. Такой анализ, проведенный на базе геолого-петрографических данных и с учетом минерагенических, по возможности петрофизических и других, позволяют связать особенности состава и свойств пород, руд, конкретных массивов и комплексов с их строением и взаимоотношениями, т.е. использовать конститущионные параметры не только для корреляции и типизации комплексов, но и для системного анализа, моделирования петрорудогенеза и генетической интерпретации. В этом заключается существо ПМА, объединяющего несомненно новую и перспективную область (направление - по мнению учеников и последователей Ю.А.Кузнецова) геологии - петрохимию магматических формаций - с минерагенией и рудно-формационным анализом [7, 8, 9, 10-14].

Термин «петроминерагенический анализ формаций" представляется более точным, чем «формационно-минерагенический анализ", который использовался автором в некоторых предыдущих работах, относящихся к развиваемому направлению. Фундаментальный вывод одного из основоположников формационного анализа Ю.А.Кузнецова с том, что «только ... исследование п а р а г е н е т и ч е с к и х а с с о ц и а ц и й (разрядка моя. - Г.Ш.) магматических комплексов с анализом их тектонической позиции, внутренней структуры и выяснением с п о с о б а о б р а з о в а н и я (разрядка моя. - Г.Ш.) может дать правильное решение вопроса" [5, с.23] получает, таким образом, логическое развитие в ПМА применительно к гетерогенным и полиформационным объектам. Прикладное (прогнозно-минерагеническое) направление формационного анализа, ориентированное на разработку принципов и методов оценки рудоносности геологических формаций, критериев регионального и локального - конкретного прогнозирования месторождений [2, 4, 6, 8, 10, 12], тесно переплетается с ПМА, но не заменяет его, поскольку основной задачей последнего является установление устойчивых, закономерных связей между различными комплексами пород и руд, т.е. конкретных формаций, с их последующим анализом и обобщением на уровне парагенезов и рядов формационных типов или видов (подтипов). Иными словами, ПМА ориентирован на выявление причинно-следственных связей эндогенного петро- и рудогенеза с целью разработки теоретических основ прогнозирования и оценки минерагенической продуктивности формаций, которые именуются одинаково, но обладают различной - как по видам полезных ископаемых, так и по масштабам рудоносности - минерагенической спецификой.

Эти возможности ПМА демонстрируются на примере альпинотипных гипербазитов, с различными комплексами которых (одного формационного типа) связаны разные месторождения: хромитов, хризотил-асбеста, антофиллит-асбеста, жадеита, нефрита и др. Генетическая однотипность гипербазитов выборок X, A1 и A2 подтверждается не только близостью их химизма по главным петрогенным компонентам (см. таблицу), но и однотипной структурой факторных нагрузок в генеральной компоненте: максимальные нагрузки на степень гидратации и окисления железа, которым противостоят по знаку закисное железо, магний, отчасти кремнезем и некоторые второстепенные для гипербазитов элементы, различающиеся по ассоциациям в разных по минерагении комплексах.

Результаты анализа показывают, что в выборке А1, по сравнению с А2, выше содержание кремнезема и закиси железа, ниже степень гидратации и окисления железа. Однако, поскольку кремнезем не имеет в А1 значимой корреляции со щелочами, но отрицательно коррелирует со степенью серпентинизации [10, 11], повышенную кремнекислотность древних асбестоносных ультрамафитов следует считать их возрастной особенностью, не связанной с более интенсивным метаморфизмом, в том числе с гранитизацией вмещающих пород. Интересной особенностью выборки А1 является значимая факторная нагрузка никеля в ГК I, обусловленная прямой корреляцией его с магнием и обратной с окисным железом, что вполне согласуется с данными о преобладании силикатного никеля в этих гипербазитах и его перераспределении, очевидно эпигенетическом, сопровождающимся окислением железа.

Сопоставление выборок Х и А2 показывает, что в последней в среднем выше окисленность железа, степень серпентинизации и содержание никеля, но несколько меньше марганца и значительно ниже дисперсии кремнезема, кальция, хрома, никеля и п.п.п. В сочетании с особенностями факторных нагрузок некоторых второстепенных петрогенных элементов и хрома (см. таблицу) это также согласуется с минерагеническим своеобразием хромитоносных и асбестоносных гипербазитов Урала, обусловленным, вероятно, как возрастными различиями, так характером и степенью преобразований, поскольку в выборку А2 не входят гипербазиты, подверженные высокотемпературному метаморфизму, с которым логично связать перестройку факторных нагрузок ряда элементов, в частности натрия и алюминия в хромитоносных массивах выборки Х.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о целесообразности выделения кратонотипных существенно гипербазитовых – ультрамафитовых комплексов, по крайней мере, в ранг самостоятельного подтипа гипербазитовой формации и перспективности ПМА для выявления факторов рудоносности, изучения связей петрологии – минерагении метаультрамафитов.

ЛИТЕРАТУРА

Альпинотипные гипербазиты Урала. Свердловск, Изд-во УНЦ АН СССР, 1985. 67 с.

2. Веселовский Н.Н., Щабалдин Г.П. К прогнозно-минерагенической оценке гипербазитовых комплексов Кольского полуострова и некоторых районов Карелии. – В кн.: Прогнозирование месторождений полезных ископаемых на Кольском полуострове. Апатиты, Изд-во КФАН СССР, 1985, с. 68–77.

3. Заварицкий А.Н. Введение в петрохимию изверженных горных пород. М., Изд-во, АН СССР, 1944. 325 с.

4. Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые / Под ред. Д.В.Рундквиста. Л., Недра, 1978. 607 с.

5. Кузнецов Ю.А. Главные типы магматических формаций. М., Недра, 1964. 387 с.

6. Масайтис В.Л., Москалева В.Н., Румянцева Н.А. и др. Магматические формации. Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций. Л., Недра, 1983. 259 с.

Петрохимия, генезис и рудоносность магматических формаций Сибири. Новосибирск, Наука, 1985. 242 с.

8. Принципы прогноза и оценки месторождений полезных ископаемых / Под ред. В.Т.Покалова. М., Недра, 1984. 437 с.

9. Строна П.А. Рудные формации как разновидность геологических формаций. – Зап.ЛГИ, 1983, т.95, с.19–31.

10. Шабалдин Г.П. Петрогеохимические особенности древних гипербазитов в связи с асбестовым и комплексным оруденением. – В кн.: Геология, поиски и разведка нерудных полезных ископаемых. Л., изд.ЛГИ, 1983, с.99–109.

11. Шабалдин Г.П. О минерагенических и петрохимических особенностях древних гипербазитовых комплексов в связи с формационной типизацией. – Зап. ЛГИ, 1983, т.95, с.69–79.

12. Шабалдин Г.П. Отражение рудогенеза в изменчивости химического состава и физических свойств ультрамафитов (Карело-Кольский регион). – Зап. ЛГИ, 1985, т.104, с.37–45.

13. Шабалдин Г.П. Геохимические и петроминерагенические особенности никеленосных и асбестоносных ультрамафитов докембрия. – В кн.: Геохимия магматических пород. Тезисы докл. XII семинара. М., изд.ГЕОХИ АН СССР, 1986, с.160–161.

14. Шабалдин Г.П., Веселовский Н.Н. Генетические и минерагенические аспекты сравнительного петрохимического анализа древних ультрамафитовых комплексов. – В кн.: Формационное расчленение, генезис и металлогения ультрабазитов. Свердловск, Изд-во УНЦ АН СССР, 1985, с.167–169.