ISSN 0135-3500. Зап. Ленингр. горного ин-та. 1990. Том 121.

УДК 550.42:546.9:552.32

В.Г.ЛАЗАРЕНКОВ, Е.А.БАЛМАСОВА, К.Н.МАЛИЧ

ВЗАИМОСВЯЗЬ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАК КРИТЕРИЙ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА ПЛАТИНОИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ В УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОДАХ

В основных и ультраосновных породах Гулинского массива Маймеча-Котуйской провинции Кондерского массива Алданской провинции в ряду пород: дуниты – оливиниты – перидотиты – клинопироксениты – габбро, – содержание редких земель возрастает, а элементов платиновой группы уменьшается. Содержание благородных металлов в ультраосновных породах хорошо коррелирует с содержанием редкоземельных элементов и плохо – с содержанием других геохимических групп элементов.

Ультраосновные породы находятся в центре внимания петрологов в связи с проблемами "плейт-тектоники" мантийного диапиризма, неистощенной, истощенной мантии и т.д. К сожалению, с геохимией гипербазитов дело обстоит менее благополучно, хотя обоснование тектонических механизмов субдукции, обдукции, рифтогенеза нуждается в привлечении геохимических данных. Настоящее исследование направлено на частичное восполнение дефицита наших знаний по элементам благородных металлов, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) в ультраосновных породах и их минералах на примере Бураковско-Аганозерского массива (Прионежье), Гулинского массива Маймеча-Котуйской щелочной провинции и массива Кондер (юго-восточная часть Сибирской платформы). Практической задачей нашего исследования являются поиски геохимических связей элементов платиновой группы (ЭПГ), а также золота и серебра с редкоземельными элементами, поскольку выяснением корреляционных связей между ЭПГ и РЗЭ не занимались ни отечественные, ни зарубежные исследователи [2].

Распределение благородных металлов редкоземельных элементов в рудном хромите Бураковско-Аганозерского массива. В нашей стране крупные расслоенные хромитоносные массивы до недавнего времени не были известны, а стратиформные хромиты в отечественной литературе не получили должного освещения. Сейчас такие массивы найдены, к их числу относится Бураковско-Аганозерский массив, с которым связаны стратиформные хромититы. Здесь приведены результаты изучения состава трех типов хромита Бураковско-Аганозерского массива:

I тип – "сидеронитовый" хромит (5–20 %), слагающий крупные (0,5–3,0 мм) зерна в хромитовых аподунитовых серпентинитах, его состав

$$(Mg_{0,56}Fe_{0,44})_{1,00}(Cr_{1,27}Al_{0,42}Fe^{3+}_{0,30}Ti_{0,03})_{2,02}O_4;$$

$$Mg\,Crt_{36}\,Crt_{29}\,Sp_{23}\,Mgt_{12}$$

Таблица

Содержание благородных металлов и лантаноидов во вкрапленных и рудных хромитах ультрабаз Бураковско-Аганозерского массива, г/т

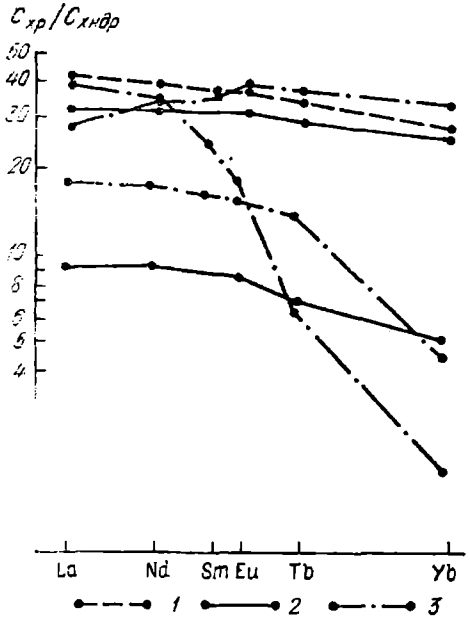
Элемент	Хромит							1	2	3
	I тип	II тип		III тип						
	Благородные металлы									
Ir	0,076	0,008	0,074	0,011	0,061	0,088	0,030	0,0450	0,0028	16
Au	0,075	0,125	0,133	0,087	0,077	0,083	0,036	0,0800	0,0005	172
Ag	6,7	1,7	14,1	1,5	2,3	7,6	1,9	5,100	0,00251	20400
	Редкоземельные элементы									
La	15,0		12,0	3,5	6,7	10,0	15,0	10,400	0,35	30
Nd	28,0		23,0	6,8	13,0	23,0	25,0	19,80	1,28	15
Sm	8,1		6,9	2,1	3,9	6,3	5,8355	5,90	0,49	12
Eu	3,3		2,7	0,8	1,4	3,1	1,7130	2,2	0,18	12
Tb	2,0		1,7	0,41	0,82	2,1	0,39	1,2	0,12	10
Yb	6,9		6,6	1,3	1,2	8,7	0,5252	4,2	0,47	9
Yb/Au	92	–	50	19	16	105	14	49	940	–
Yb/Ir	91		89	120	20	99	17	93	–	–
Yb/Ag	1,0	–	0,5	0,9	0,5	1,1	0,3	0,8	–	–

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории НИИЗК ЛГУ П.А.Вогановым; 1 – среднее из семи анализов; 2 – содержание в примитивной мантии [4]; 3 – коэффициенты накопления благородных металлов и РЗЭ в среднем хромите по сравнению с примитивной мантией.

II тип – мелкие зерна рудного хромита I генерации размером 0,05–0,5 мм, включенные в крупные кристаллы диопсида или бронзита: $(Mg_{0,59}Fe^{2+}_{0,40}Mn_{0,01})_{100}(Cr_{1,24}Al_{0,43}Fe^{3+}_{0,29}Ti_{0,03}Ni_{0,01})_{2,00}O_4$; $MgCrt_{37}Crt_{28}Sp_{22}Mgt_{13}$.

тип – крупные зерна рудного хромита II генерации размером 0,5–1,3 мм, слагающие хромититовые прожилки в хромититах: $(Mg_{0,56}Fe^{2+}_{0,43}Mn_{0,01})_{100} \times (Cr_{1,26}Al_{0,43}Fe^{3+}_{0,28}Ti_{0,03})_2O_4$; $MgCrt_{36}Crt_{30}Sp_{23}Mgt_{11}$.

Микрозондовые определения показывают, что хромиты в пределах одного зерна довольно однородны по составу и не обнаруживают зональности. Три типа хромшпинелидов Бураковско-Аганозерского массива близки по составу и относятся к хромитам со значительной долей магнохромитового и шпинелевого компонентов. На диаграмме Т.Н.Ирвайна рудный хромит Бураковско-Аганозерского массива располагается в верхней части поля стратиформных хромитов и характеризуется высоким Cr/Fe –отношением. Сравнение рудного хромита Главного хромититового горизонта Бураковско-Аганозерского массива с рудным хромитом из других расслоенных массивов показывает, что по составу он близок к рудному хромиту финских месторождений массивов Кеми и Торнио, Стилпоортского пласта Бушвельдского массива и горизонта G Стиллуотерского массива, т.е. соответствует составу хромита давно эксплуатирующихся стратиформных хромитовых месторождений. Методом инструментального нейтронно-активационного анализа в хромитах трех типов были определены содержания ряда благородных металлов и редкоземельных элементов (табл.I).



ис.1. Хондрит-нормализованные отношения сонний редкоземельных элементов в различных хромита из пород Главного хромитового гозонта Бураковско-Аганозерского массива

1 – "сидеронитовый" хромит из аподунитовых серпентинитов; 2 – пойкилитовый хромит из хромититов; 3 – прожилковый хромит из хромититов

Установлено, что среди проанализированных на благородные металлы образцов разных типов хромита наибольшие концентрации характерны для серебра (табл.I). В литературе данные о содержании серебра в хромитах стратиформных месторождений отсутствуют, в хромититах горизонта UG–2 Бушвельдского массива содержание этого элемента составляет 0,05 г/т. По сравнению с примитивной мантией [4], рудный хромит обнаруживает резкое обогащение (в сотни и тысячи раз) золотом и серебром и значительное обогащение (более чем в десять раз) иридием и редкими землями.

Сам по себе факт обогащения рудного хромита благородными металлами совпадает с обогащением этими элементами стратиформных хромититов Бураковско-Аганозерского массива. По содержанию редких земель и La/Sm –отношению рудный хромит Бураковско-Аганозерского массива близок к габбро расслоенных массивов района Саргур, Южная Индия [3].

Графики хондрит-нормализованных отношений РЗЭ в хромитах свидетельствуют о более или менее равномерном распределении в них легких и тяжелых лантаноидов (рис.1). Расчет парных коэффициентов корреляции между благородными металлами (иридием, серебром) и лантаноидами свидетельствует о высокой корреляции иридия и серебра с тяжелыми лантаноидами (табл.2). Этот факт представляет определенный поисковый интерес, поскольку ранее корреляция платиноидов и лантаноидов, насколько нам известно, не отмечалась. Высокая корреляция иридия и серебра с тяжелыми лантаноидами позволяет использовать эти элементы как индикаторы благороднометальной минерализации в расслоенных массивах.

Таблица 2

Коэффициенты ранговой корреляции иридия и серебра с редкоземельными элементами в хромитах Бураковско-Аганозерского массива

Элемент	Ag	La	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb
Ir	0,857	0,643					0,857
	1,000	1,072		0,809		0,900	0,809
Au		-0,343		-0,914		0,457	0,342

Распределение благородных металлов и редкоземельных элементов в породах Гулинского массива. Этот массив обнажается на площади около 600 км^2. Ультраосновные породы слагают 70–80 % обнаженной части массива. Среди них ведущее место принадлежит серпентинизированным дунитам и меймечитам, верлиты находятся в подчиненном количестве, клинопироксениты, в том числе рудные (магнетитовые), образуют густую сеть жил в дунитах. Данные о распределении элементов платиновой группы и золота в породах Гулинского массива приведены в табл.3.

Установлено, что содержание элементов платиновой группы максимально в дунитах и существенно уменьшается в верлитах, меймечитах, рудных пироксенитах и ийолитах. На диаграмме хондрит-нормализованных отношений содержаний ЭПГ в породах Гулинского массива (рис.2) серпентинизированные дуниты, с одной стороны, и все другие породы, с другой, занимают несколько обособленное положение. Для дунитов характерно следующее распределение ЭПГ: $Os > Pd > Ir > Ru > Pt > Rh$, а на кривой хондрит-нормализованных отношений – обогащение осмием, палладием и иридием и обеднение рутением, платиной и родием. Обращает на себя внимание, что у дунитов $\frac{Ru + Ir + Os}{Pt + Pd + Rh} > 1$ для верлитов распределение ЭПГ имеет вид: $Pd > Pt > Rh, Ru, Os > Ir$, для

Таблица 3

Распределение элементов платиновой группы в горных породах Гулинского массива, мг/т

Горная порода	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	ЭПГ+Au	Pt/Pd	n
Дуниты	9	64	7	19	35	72	5	211	0,14	9
Верлиты	15	35	3	3	<2	<10	5	61	0,42	2
Рудные пироксениты	<10	30	4	3	10	<10	34	81	<0,33	2
Меймечиты	10	35	5	4	2	<10	8	64	0,3	2
Ийолиты	28	8	8	3	8	<10	7	58	5,0	4

Примечание. Анализы выполнены пробирно-химико-спектральным методом в лаборатории ВНИПИ „Механобр", аналитики А.Е.Аладышкина, И.А.Соловьева, Ю.Г.Швырков; *n* - число анализов.

рудных пироксенитов - Pd>Ir>Pt, Os>Rh, Ru; для меймечитов - Pd>>Pt>Os>Rh>Ru>Ir.

Содержание редких земель в ультрабазитах Гулинского массива минимально в дунитах и существенно возрастает в клинопироксенитах и меймечитах (табл.4). На диаграмме хондрит-нормализованных отношений дуниты Гулинского

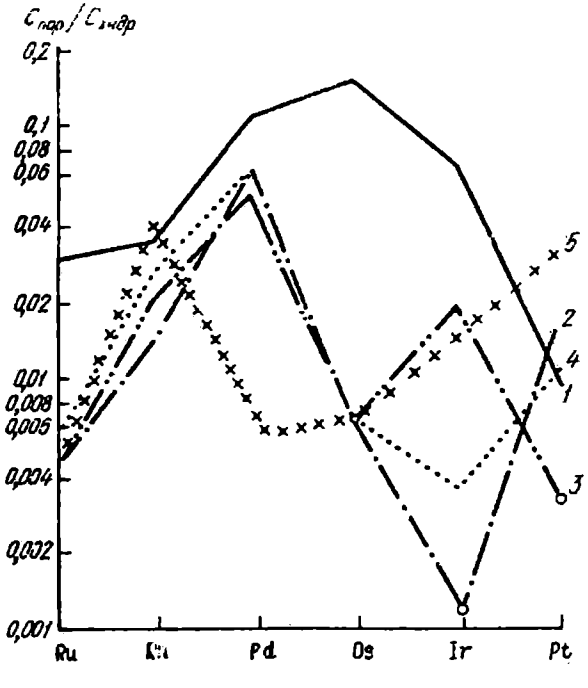


Рис.2. Хондрит-нормализованные отношения содержаний элементов платиновой группы в горных породах Гулинского массива
1 - серпентинизированный дунит; 2 - верлит; 3 - рудный клинопироксенит; 4 - меймечит; 5 - ийолит

Таблица 4

Распределение РЗЭ в ультраосновных породах Гулинского массива

Элемент	Дунит	Оливинит	Меймечит	Рудный пироксенит	Хондрит (по [1])
La	0,53	25,0	24,7	7,5	0,23
Ce	2,4	51,0	53,4	22,0	0,62
Sm	0,31	2,2	4,8	4,8	0,143
Eu	0,14	0,8	1,7	1,6	0,055
Tb	0,062	0,5	0,54	0,64	0,044
Yb	0,13	0,8	0,61	0,52	0,158
Lu	0,02	0,05	0,07	0,073	0,029
ΣTR	3,592	80,35	85,82	37,133	1,271
Y	5,0	7,7	11,2	12,1	

массива, с одной стороны, и остальные горные породы, с другой, также образуют две самостоятельные группы. Как следует из этих диаграмм, для дунитов кривые хондрит-нормализованных отношений приближаются к кривым хондритовых отношений содержаний РЗЭ, тогда как у других пород обнаруживается обогащение легкими лантаноидами. Общий вывод, следующий из анализа распределения ЭПГ и РЗЭ в породах Гулинского массива сводится к тому, что в ряду ультрамафитов: дуниты – клинопироксениты – оливиниты – меймечиты, – содержание ЭПГ падает, а содержание РЗЭ возрастает.

Распределение благородных металлов и редкоземельных элементов в породах Кондерского массива. Концентрически-зональный массив Кондер располагается в зоне активизации на пересечении нескольких разломов. В плане он имеет изометрическую форму и площадь около 40 км^2. Примерно 70–75 % площади массива слагает дунитовое ядро, окруженное по периферии кольцом клинопироксенитов, в том числе магнетитовых, и меланократовых габброидов. Щелочные породы, в частности нефелинсиенитовые пегматиты, образующие жильную и дайковую фации, развиты среди ультрабазитов массива. Последовательность формирования горных пород в Кондерском массиве гомодромная (от ранних к поздним): дуниты и хромититы, клинопироксениты и габбро, щелочные горные породы.

Как видно из табл.5, сумма редких земель минимальная в дунитах и оливинитах Кондерского массива, промежуточна – в клинопироксенитах и габбро периферии массива и максимальна в магнетитовых клинопироксенитах рудного комплекса. На диаграмме хондрит-нормализованных отношений РЗЭ (рис.3) Кондерского массива дуниты и оливиниты, с одной стороны, и клинопироксениты и габбро, с другой, образуют две разные группы подобно тому, как это наблюдается в породах Гулинского массива. Вместе с тем обращает на себя внимание более пологий, близкий к отношению РЗЭ в хондритах, характер кривых хондрит-нормализованных отношений в породах Кондерского массива,

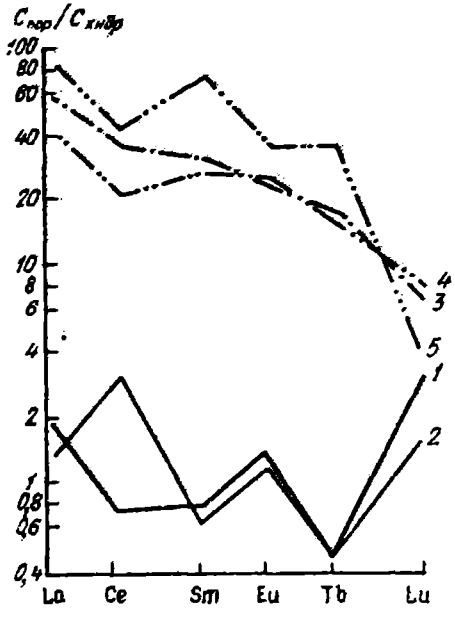


Рис.3. Хондрит-нормализованные отношения содержаний редкоземельных элементов в ультрабазитах Кондерского массива
1 – дунит; 2 – оливинит; 3 – клинопироксенит периферии; 4 – меланократовое габбро; 5 – клинопироксенит рудного комплекса (юго-западная часть массива)

что, с нашей точки зрения, свидетельствует о несколько большей близости вещества Кондерского массива к составу мантийного субстрата.

Анализ матрицы коэффициентов парной корреляции лантана, церия и иттрия с элементами благородных металлов для дунитов и хромититов Кондерского массива (табл.6) показывает, что высокие положительные коэффициенты связывают иридий и осмий с лантаном, палладий – с церием и иттрием, серебро – с иттрием. В магнетитовых клинопироксенитах рудного комплекса высокие положительные коэффициенты наблюдаются между иридием и осмием, церием и иттрием, в клинопироксенитах – между серебром и иттрием. Высокие отрицательные коэффициенты корреляции связывают в дунитах и хромититах осмий и платину с церием и иттрием, а серебро – с лантаном. В клинопироксенитах и меланократовых габброидах такие коэффициенты корреляции наблюдаются между рутением, иридием и иттрием. В целом, следует отметить, что для целого ряда благородных металлов характерны сильные корреляционные связи с лантаном, церием и иттрием.

Таблица 5

Содержание РЗЭ и ЭПГ в отдельных образцах ультрабазитов Кондерского массива, г/т

Элемент	Дунит, № 87-17	Оливинит, № 16-2	Клинопироксенит, № 25-11	Габбро, № 16-21	Магнетитовый клинопироксенит № А-14
			Редкоземельные элементы		
La	0,66	0,41	15,7	9,2	27,9
Ce	0,60	2,7	26,0	17,0	34,0
Sm	0,13	0,12	5,3	5,0	14,2
Eu	0,1	0,078	1,52	1,54	2,28
Tb	0,02	0,02	0,71	0,69	1,52

Элемент	Дунит, № 67-17	Оливинит, № 16-2	Клинопироксенит, № 25-11	Габбро, № 16-21	Магнетитовый клинопироксенит, № А-14
Lu	0,11	0,057	0,24	0,30	0,14
Y					
ΣTR	1,62	3,39	49,47	33,7	80,0
	Элементы благородных металлов				
Os	0,006	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Ir	0,027	<0,006	<0,005	<0,005	<0,008
Ru	0,004	0,005	0,008	0,007	0,003
Rh	0,013	<0,004	<0,004	0,004	<0,02
Pt	0,070	0,127	0,030	0,040	0,300
Pd	0,039	0,045	<0,030	0,062	0,110
Au	0,007	0,004	<0,01	0,01	<0,01
Ag	0,007	0,1	0,039	0,132	0,066
Σ9ПГ	0,159	>0,177	>0,038	>0,113	>0,410

Таблица 6

Коэффициенты корреляции I ранга лантана, церия и иттрия с элементами благородных металлов в ультрамафитах Кондерского массива

Порода	Элемент	Pd	Pt	Rh	Ru	Ir	Os	Au	Ag
Дуниты и хромиты, n = 24	La	-0,15	0,16	-0,14	-0,18	-0,05	0,97	-0,17	-0,52
	Ce	-0,15	0,10	-0,15	-0,23	1,00	0,09	-0,17	0,41
Хромититы, n = 12	La	-0,35	-0,19	-0,42	-0,20	-0,34	0,58	0,27	-0,99
	Ce	0,71	-0,61	-0,34	0,27	0,03	-0,66	-0,79	-0,09
	Y	0,54	-0,62	-0,30	-0,01	0,58	-1,00	-0,59	0,51
Клинопироксениты, n 9	Y	-0,29	-0,99	0,01	-0,99	-0,99	-0,21	-0,90	0,81
Меланократовые габброиды, n = 12	Y	0,25	0,16	-0,51	0,58	-0,58		-0,41	0,15
Магнетитовые клинопироксениты рудного комплекса, n 30	La	-0,15	0,20	0,01	0,05	0,20	0,41	0,40	0,12
	Ce	-0,15	0,15	-0,39	-0,18	0,61	0,63	-0,16	0,19
	Y	-0,18	0,02	-0,64	-0,07	0,88	0,75	-0,18	0,52

Выводы

I. В ультраосновных – основных породах, по данным изучения пород Гулинского и Кондерского массивов, в ряду: дунит – оливинит – перидотит – клинопироксенит – габбро, – в целом содержание редких земель возрастает, а содержание элементов платиновой группы снижается.

2. Содержание благородных металлов в ряде ультраосновных пород хорошо коррелирует с содержанием редкоземельных элементов и плохо с содержанием других элементов, включая элементы группы железа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балашов Ю.А. Изотопно-геохимическая эволюция мантии и коры. М.: Наука, 1985. 202 с.

2. Распределение благородных металлов и редкоземельных элементов в рудном хромите Буровско-Аганозерского массива / В.Г.Лазаренков, Е.А.Балмасова, П.А.Ваганов, Н.М.Онищика Вестн. ЛГУ. 1989. Сер. 7, вып. 4 (№ 28). С. 68-70.

3. Срикантапа К., Хёрманн П.К., Райт М. Петрология и геохимия расслоенных ультраосновных - основных комплексов архейского кратона Карнатака, Южная Индия // Геохимия архея. М.: Мир, 1987. С. 173-200.

4. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора. М.: Мир, 1988. 585 с.