

А.А. Ефимов, Т.А. Потапова

О ПОВЕДЕНИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ И ДРУГИХ СЛЕДОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ МЕТАМОРФИЗМЕ ГАББРО-НОРИТОВ ПЛАТИНОНОСНОГО ПОЯСА УРАЛА

Ранее было показано, что протолитом всего множества габбро-норитов Платиноносного пояса являются ортоклазосодержащие лабрадоровые офитовые габбро-нориты, сохранившие признаки магматической кристаллизации. Эти породы достаточно редки; в большинстве случаев, уже будучи твердыми, они испытали регрессивный метаморфизм, в истории которого выделяются две эпохи: ранняя эпоха динамометаморфизма гранулитовой фации низкого давления (условия сжатия, пластическое течение) и поздняя эпоха водного метаморфизма амфиболитовой фации (условия растяжения, статический режим). В ходе первой офитовые габбро-нориты преобразуются в двупироксеновые габбро без ортоклаза со структурой, более или менее приближающейся к порфирокластической или гранобластовой, – по сути дела, в двупироксеновые гранулиты, которые также принято называть габбро-норитами; в ходе второй эпохи они обычно преобразуются в гранобластовые анортит-клинопироксен-роговообманковые «габбро» так называемого серебрянского типа (в строгом фациальном смысле – в габброподобные амфиболиты). Метаморфические преобразования сопровождаются химическими изменениями с тенденцией базификации: имеет место вынос Si и щелочей и привнос Ca, Mg и Fe [Ефимов, Кууспалу, 1962; Ефимов, Ефимова, 1967; Ефимов, 1971, 1999].

Было показано также, что эти изменения ярко проявляются в поведении характерного следового элемента – стронция: в разрезе габбро-норитового блока Кумбинского массива, сложенного преимущественно первичным типом, уровень предельного (в плагиоклазе) содержания Sr составляет около 1100 г/т, в разрезе Валенторского блока в Кытлымском массиве, сложенном «модифицированными» габбро-норитами со следами деформации и бластеза, – около 880 г/т, в разрезе еще более сильно деформированных, обычно гранобластовых или порфирокластических габбро-норитов Серебрянского блока в том же массиве – около 1700 г/т.

Можно предполагать, что две группы кытлымских габбро-норитов суть комплементарные продукты обеднения и обогащения одного и того же протолита – офитового габбро-норита типа Кумбы, но не дискретные геохимические группы с изначально разными содержаниями. Наконец, в серебрянских роговообманковых «габбро», образовавшихся по серебрянским габбро-норитам, предельное содержание Sr достигает 2500 г/т, т.е. имел место значительный привнос Sr [Ефимов и др., 1989].

Представительные пробы из тех же объектов были проанализированы методом ICP MS на 42 следовых элемента, включая группу редких земель. Поскольку последовательность метаморфических событий и общий метаморфический тренд надежно установлены независимыми геолого-петрологическими методами [Ефимов, 1999; Ефимов и др., 1999], есть возможность впервые оценить геохимические изменения, имевшие место в ходе этого необратимого процесса. Группу офитовых габбро-норитов типа Кумбы можно считать исходным субстратом (начальной точкой), две группы кытлымских габбро-норитов – продуктом промежуточных этапов, а серебрянские «габбро» – конечным продуктом геохимической эволюции того же субстрата. В таблице 1 приведены средние концентрации 28 следовых элементов и средние суммарные концентрации РЗЭ для выделенных петрографических групп 1–4 (протолит – валенторская группа – серебрянская группа – группа серебрянских «габбро»), вычисленные соответственно по 2, 2, 4 и 6 анализам. Средние концентрации каждого элемента в группах нормированы по средним содержаниям в протолите, т.е. получены цифры, характеризующие обеднение или обогащение пород относительно протолита. Далее, строки таблицы ранжированы по убыванию нормированных значений, в связи с чем порядок элементов в таблице отличается от принятого и отражает величину привноса (больше 1,0) и выноса (меньше 1,0) следовых элементов в ходе необратимого про-

Средние и нормированные концентрации следовых элементов

Элемент		Средние содержания по группам (в скобках – количество анализов)				Нормированные средние содержания по группам			
Символ	Номер	Гр. 1 (2)	Гр. 2 (2)	Гр. 3 (4)	Гр. 4 (6)	Гр. 1	Гр. 2	Гр. 3	Гр. 4
Cr	1	17,692	20,956	29,676	117,780	1	1,185	1,677	6,657
Tl	2	0,220	0,009	0,445	0,853	1	0,042	2,021	3,870
Cu	3	49,111	52,231	67,819	127,697	1	1,064	1,381	2,600
Ni	4	26,518	20,075	32,258	57,109	1	0,757	1,216	2,154
Sr	5	624,651	528,262	825,514	798,522	1	0,846	1,322	1,278
Co	6	36,659	33,289	40,867	46,388	1	0,908	1,115	1,265
Sc	7	34,721	32,590	32,029	40,260	1	0,939	0,922	1,159
Bi	8	0,013	0,018	0,022	0,015	1	1,347	1,711	1,152
V	9	508,533	346,623	366,099	567,347	1	0,682	0,720	1,116
Ga	10	18,151	19,600	18,624	17,513	1	1,080	1,026	0,965
Mn	11	1625,24	1279,59	1639,78	1298,28	1	0,787	1,009	0,799
Ti	12	5873,32	4610,94	4877,99	4192,08	1	0,785	0,831	0,714
Zn	13	95,586	72,931	86,923	64,031	1	0,763	0,909	0,670
W	14	0,289	0,187	0,287	0,190	1	0,649	0,994	0,659
Y	15	14,615	10,703	17,815	8,431	1	0,732	1,219	0,577
Ta	16	0,085	0,042	0,063	0,042	1	0,494	0,747	0,502
ΣTR	17	41,398	24,067	46,907	16,669	1	0,581	1,133	0,403
Hf	18	0,885	0,387	0,562	0,320	1	0,437	0,635	0,361
Be	19	0,466	0,363	0,498	0,152	1	0,781	1,069	0,327
Li	20	5,795	4,869	2,677	1,865	1	0,840	0,462	0,322
Zr	21	30,992	13,401	16,824	9,189	1	0,432	0,543	0,296
Mo	22	0,727	0,369	0,309	0,183	1	0,508	0,426	0,251
Pb	23	3,211	1,509	1,462	0,656	1	0,470	0,455	0,204
Ba	24	142,639	72,324	121,597	27,065	1	0,507	0,852	0,190
Nb	25	0,972	0,521	0,505	0,147	1	0,536	0,520	0,151
U	26	0,153	0,056	0,039	0,017	1	0,369	0,253	0,109
Rb	27	8,398	2,624	1,684	0,794	1	0,313	0,201	0,095
Th	28	0,523	0,131	0,116	0,041	1	0,250	0,222	0,079
Cs	29	0,230	0,058	0,015	0,011	1	0,250	0,066	0,046

цесса превращения габбро-норита в анортит-клинопироксен-роговообманковое “габбро”.

Данные таблицы наглядно изображены на диаграмме (рис. 1). Отчетливо видно, что графики всех четырех выделяемых петрографических групп, при частных колебаниях и отклонениях, обнаруживают общую тенденцию, наиболее ярко выраженную в группе 4, кривая которой символизирует конечный результат химического преобразования протолита. Только 9 элементов из 28 могут быть причислены к привносимым, а если не принимать во внимание Tl и Bi, содержания которых много меньше 1 г/т, то привнос 7 элементов отчетлив – это (в порядке убывания нормированных содержаний) Cr, Cu, Ni, Sr, Co, Sc, V. Все эти элементы, кроме Sr, относятся к одной и той же группе переходных металлов IV периода Периодичес-

кой системы (группа железа) и имеют свойства от литофильных до халькофильных. Стронций – литофильный элемент с большим ионным радиусом – выглядит в этом перечне несколько странно, однако его привнос надежно установлен массовыми определениями концентраций в породах и в плагиоклазе [Ефимов и др., 1989].

Остальные 19 элементов обнаруживают вынос; этот ряд начинается несколько условно Ga (0,965), затем продолжается элементами той же группы железа (Mn, Ti, Zn), заканчиваясь крупноионными литофильными элементами – Rb и Cs (0,079 и 0,046 – ярко выраженный вынос). В ряду выносимых элементов, концентрации которых в протолите довольно значительны (10–15 г/т и более), в порядке убывания нормированных концентраций следуют Ga, Mn, Ti, Zn, Y, Li, Zr, Ba, Rb.

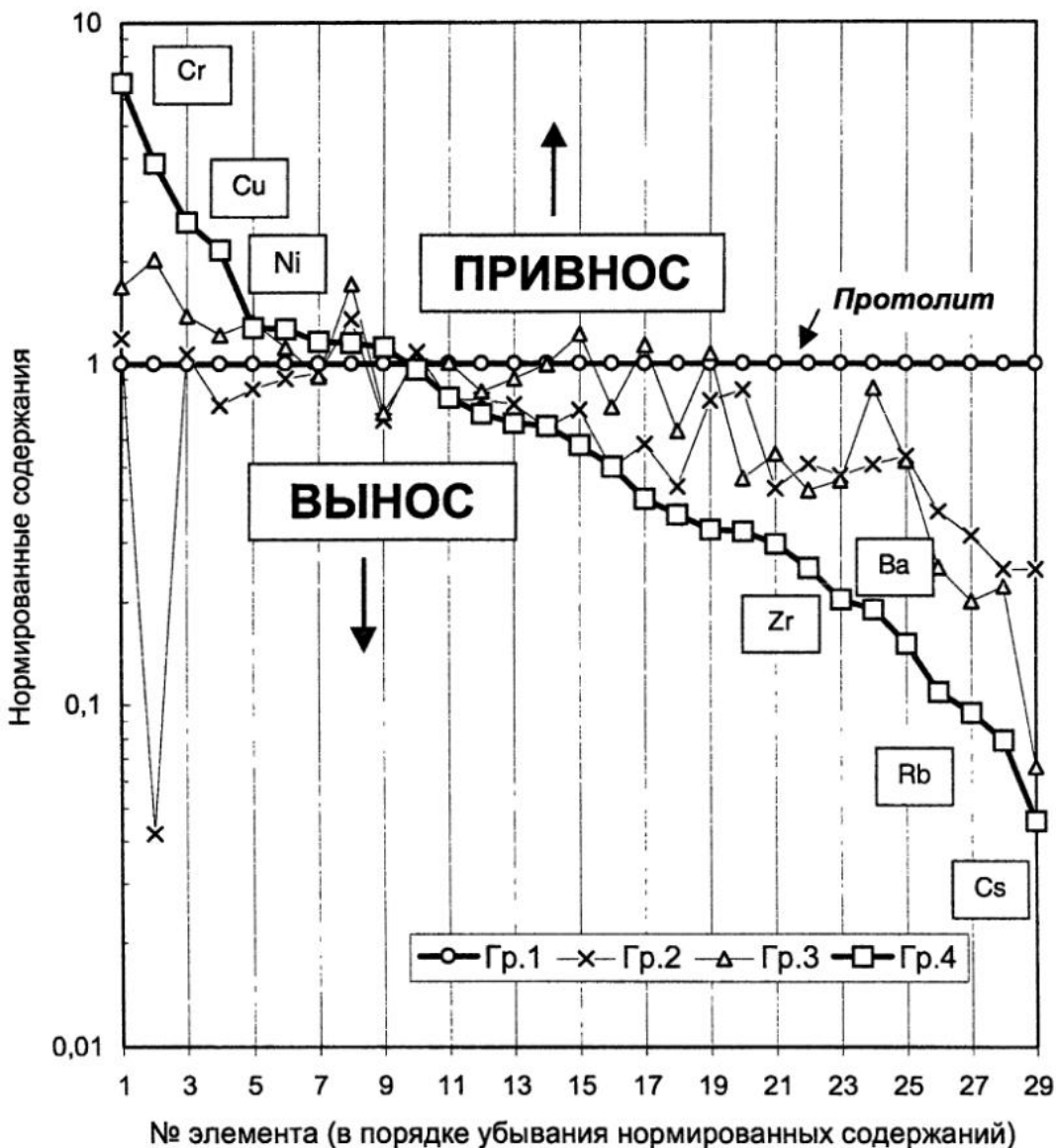


Рис. 1. Графики нормированных по протолиту содержаний следовых элементов в продуктах метаморфизма протолита (офитовых габбро-норитов типа Кумбы).

Гр. 1 – офитовые габбро-нориты типа Кумбы (протолит); Гр. 2 – низкостроение габбро-нориты Валенторского блока (Кытлымский массив) со следами бластеза и деформации; Гр. 3 – высокостроение, деформированные и рекристаллизованные габбро-нориты Серебрянского блока (Кытлымский массив); Гр. 4 – серебрянские анортит-клинопироксен-роговообманковые “габбро” (габбро-амфиболиты) Серебрянского блока (Кытлымский массив). Цифры по оси абсцисс соответствуют номерам элементов в таблице.

Не менее показательное поведение группы РЗЭ, входящей в совокупность выносимых элементов (рис. 2). Габбро-норитам в целом (гр. 1–3) свойствен сходный тип трендов фракционирования РЗЭ: общий отрицательный наклон с преобладанием легких РЗЭ, при доста-

точно хорошо выраженной положительной европиевой аномалии. Средние значения отношения La_N/Yb_N для габбро-норитовых групп близки: для предполагаемого протолита (гр. 1) около 2,8, для серебрянских габбро-норитов (гр. 3) также около 2,8, а для валенторских (гр. 2) –

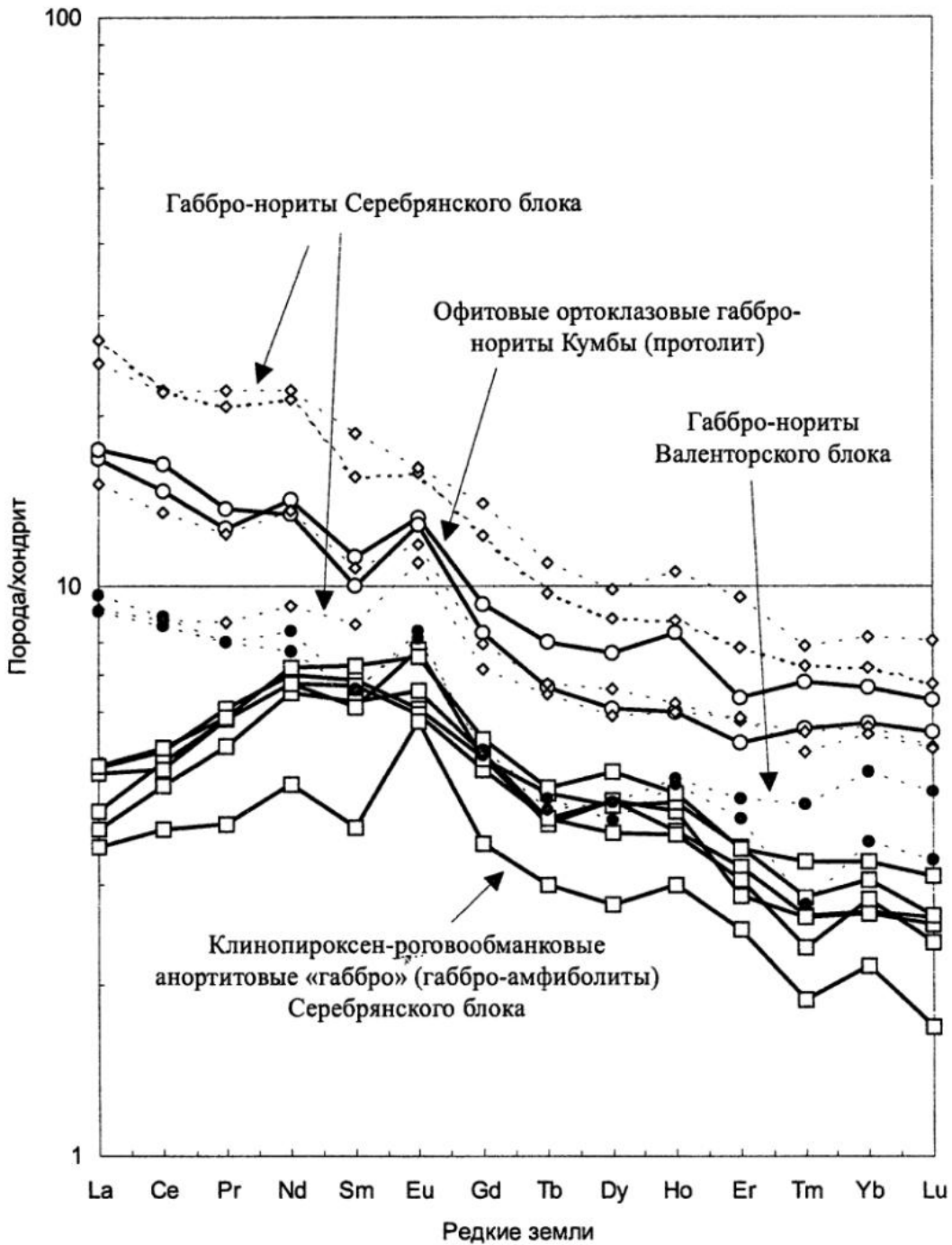


Рис. 2. Нормированные по хондриту графики РЗЭ для габбро-норитового протолита (см. перечень групп в подписи к рис. 1) и продуктов его метаморфизма (индивидуальные анализы).

около 2,3. Однако по уровню концентраций, т.е. по сумме РЗЭ, три группы габбро-норитов существенно различаются: первая содержит около 41, третья – около 47, а вторая – всего около 24 г/т. По-видимому, в данном случае, как и в

случае со Sr, мы имеем комплементарные продукты процесса обеднения и обогащения одного и того же субстрата, но не дискретные геохимические группы с изначально разными содержаниями. Сохранение геометрии тренда

фракционирования, возможно, связано с тем, что все члены габбро-норитового множества имеют один и тот же парагенезис (два пироксена, лабрадор, магнетит). Далее, поскольку вывод об образовании серебрянских роговообманковых "габбро" по габбро-норитам хорошо обоснован имеющимися геолого-петрологическими данными, можно считать, что все особенности распределения РЗЭ в группе роговообманковых габбро обусловлены водным метаморфизмом, сопровождавшимся полной структурно-химической трансформацией исходных габбро-норитов и сменой парагенезисов. При этом имели место абсолютный вынос РЗЭ (с понижением суммарных концентраций в 2–3 раза) и радикальное изменение тренда фракционирования, демонстрирующего почти симметричное обеднение легкими и тяжелыми РЗЭ относительно средних (отношение La_N/Yb_N около 1,5) при наличии хорошо выраженной положительной европиевой аномалии.

Резюмируя, можно сказать, что сложная метаморфическая и химическая эволюции калиевых габбро-норитов типа Кумбы, на месте которых в конечном счете возникают анортит-клинопироксен-роговообманковые "габбро" серебрянского типа, приводит к появлению весьма обедненного следовыми элементами состава. Две тенденции проявлены наиболее отчетливо: обогащение шестью элементами группы железа и резкое обеднение РЗЭ и крупноионными литофильными элементами (так называемыми LILE) – Li, Ba, Rb, Cs, к которым следует добавить и петрогенные Na и K. Однако поведение Sr, принадлежащего к той же группе LILE, столь же отчетливо противоположно. Очевидно, главная причина такого поведения следовых элементов заключается в смене парагенезисов: в ходе процесса исчезают ортоклаз и два пироксена, появляется и исчезает биотит,

начинает доминировать роговая обманка, с которой связаны сульфиды меди (с серебрянскими "габбро", как известно, связаны медносульфидные месторождения так называемого волковского типа). Необычное поведение Sr, возможно, объясняется тем, что плагиоклазовая фаза, с которой (а не с элементом Ca, как это считалось ранее) Sr тесно связан, непременно присутствует на всем протяжении процесса.

Приведенные данные имеют немаловажное методическое значение: они наглядно демонстрируют, что корректное толкование распределения следовых элементов в габбровых породах Платиноносного пояса невозможно без понимания тектоно-метаморфической истории этого сложного образования.

Список литературы

- Ефимов А.А.* Явления калиевого метасоматоза в габбро-норитах Платиноносного пояса Урала // Доклады АН СССР. 1971. Т. 198. № 5. С. 1171–1174.
- Ефимов А.А.* Платиноносный пояс Урала: тектоно-метаморфическая история древней глубинной зоны, записанная в ее фрагментах // Отеч. Геология. 1999. № 3. С. 31–39.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П.* Кытлымский платиноносный массив. М.: Недра, 1967. 336 с.
- Ефимов А.А., Ефимова Л.П., Маегов В.И.* Стронций в плагиоклазе уральских габбро: петрогенетический и прикладной аспекты // Геохимия. 1989. № 11. С. 1541–1553.
- Ефимов А.А., Куусалу Т.И.* О природе анортитовых габбро Серебрянского Камня и связанного с ними медного оруденения // Доклады АН СССР. 1962. Т. 145. № 1. С. 181–184.
- Ефимов А.А., Потапова Т.А., Берлибле Д.Г.* Химическая эволюция пироксенов уральских габбро: роль барического, термического, кислородного и химического факторов // Геохимия. 1999. № 5. С. 466–485.