ГЕОХИМИЯ, 2003, № 2, с. 172–180

ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ АМФИБОЛАХ

© 2003 г. Г. М. Другова, С. Г. Скублов

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН
199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2
e-mail: skublov@ad.iggp.ras.spb.ru

Поступила в редакцию 05.06.2001 г.

Исследование геохимии редкоземельных и редких элементов в кальциевых амфиболах нюрундуканского мафического комплекса в Северо-Западном Прибайкалье показало зависимость их содержания и распределения от степени метаморфизма. Суммарное содержание редкоземельных элементов в амфиболах, так же как и отношение La/Yb, понижается с падением температуры метаморфизма. Постоянство коэффициентов распределения редких и редкоземельных элементов между амфиболами и сосуществующими с ними гранатами, которое служит критерием равновесия, лучше всего достигается в породах гранулитовой фации. В породах амфиболитовой фации такое закономерное распределение РЗЭ нарушается в связи с началом развития метасоматических процессов. Амфиболы из метасоматических пород характеризуются кривыми распределения РЗЭ, отличающимися от распределений в амфиболах пика метаморфизма, и часто показывают распределение РЗЭ, унаследованное от минерала, за счет которого амфибол образовался. Это дает возможность определять последовательность минералообразования в метасоматически измененных породах. Сравнение особенностей распределения РЗЭ в амфиболах нюрундуканского комплекса с амфиболами высокобарического лапландского гранулитового комплекса на Балтийском щите позволяет говорить об отсутствии влияния давления на содержание и распределение РЗЭ в амфиболах при превалирующем контроле температуры метаморфизма.

Введение. Развитие в последнее время высокоточных методов определения малых количеств редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в минералах, таких как ИНАА, ионный и протонный микрозонд, лазерная абляция с индуктивно-связанной плазмой, открыло новые возможности исследования петрологии полиметаморфических комплексов. Определение РЗЭ в гранатах, выполненное ранее, показало эффективность совместного рассмотрения поведения главных и редких элементов для восстановления эволюции метаморфизма конкретных комплексов [1, 2]. Как и гранаты, амфиболы отличаются высокой концентрацией редких и редкоземельных элементов. Широкое развитие амфиболов в породах от зеленосланцевой до гранулитовой фации делает их особенно привлекательными при реконструкции последовательности и характера метаморфических процессов. Тем не менее амфиболы находят очень ограниченное использование в петрологическом моделировании из-за своей минералогической и кристаллохимической сложности. Известные минеральные термометры и барометры для амфиболсодержащих ассоциаций являются эмпирическими и не всегда согласуются с расчетными термодинамическими данными [3]. Экспериментальные работы по определению коэффициентов распределения ряда редких элементов между амфиболом и расплавом, а также данные теоретических расчетов выявили расхождение по сравнению с коэффициентами, определенными в природных объектах [4]. Кроме этого, рядом исследователей было установлено, что РЗЭ и редкие элементы изоморфно входят не в одну, а в несколько кристаллохимических позиций в амфиболах, что объясняет их разную подвижность и неоднозначное поведение этих элементов в петрологических процессах [4, 5].

До настоящего времени исследование распределения РЗЭ в метаморфических кальциевых амфиболах не проводилось, наиболее изученными являются амфиболы из магматических пород [6, 7 и др.] и эклогитов [8 и др.]. В литературе приводятся лишь единичные определения РЗЭ в амфиболах гранулитовой фации метаморфизма [9–11], а данные по распределению РЗЭ в амфиболах из пород амфиболитовой фации практически отсутствуют [12].

Основой данной работы является анализ распределения РЗЭ и редких элементов в кальциевых амфиболах (роговых обманках) из нюрундуканского мафического комплекса в Северо-Западном Прибайкалье, где кристаллизация амфиболов осуществлялась в широком диапазоне *P–T*-параметров метаморфизма (таблица). Кроме того, были исследованы амфиболы из пород лапландского гра-

Составы амфиболов по главным (мас. %) и редким (г/т) элементам

Компонент	Гранулитовая фация метаморфизма								Высокотемпературная амфиболитовая фация				Низкотемпературная амфиболитовая		Метасоматические породы		
	Керсутиты		Коричневые и бурые роговые обманки						Зеленые и буро-зеленые роговые обманки				Голубовато-зеленые роговые обманки		Голубовато-зеленые роговые обманки		
	3/4	411	483	522	632	Lap-12	Lap-13	C-7	487	499	23	54/3	12/3	75	133	14б	82д
SiO_2	40.72	40.71	42.01	43.66	40.49	40.95	42.24	40.69	43.66	44.06	44.45	42.03	42.32	40.21	43.51	42.34	44.55
TiO_2	4.83	5.52	2.12	1.88	1.99	2.43	2.38	2.17	1.70	1.29	0.91	1.46	0.34	0.51	0.69	0.79	0.41
Al_2O_3	13.62	13.17	11.12	11.00	13.23	11.60	13.41	11.87	9.77	10.62	14.11	13.13	15.04	19.17	15.46	17.89	15.86
FeO*	9.94	11.32	13.86	15.71	18.12	21.78	16.19	20.95	16.86	13.37	13.72	19.87	16.98	9.71	14.03	15.60	11.73
MnO	0.13	–	0.22	–	0.21	0.19	0.22	0.16	0.36	–	–	–	–	0.03	–	0.17	0.01
MgO	12.71	12.06	13.43	11.28	9.35	6.50	9.18	8.01	11.17	13.49	11.52	7.07	9.51	13.60	11.44	9.81	12.36
CaO	12.18	11.19	11.42	11.40	11.23	10.75	10.94	10.56	11.4	11.92	10.21	11.43	10.56	9.78	10.35	10.90	11.27
Na_2O	2.46	2.58	1.79	1.44	1.50	1.98	1.92	2.29	1.61	2.20	2.64	2.17	2.51	3.52	2.06	–	0.72
K_2O	1.75	1.59	1.12	1.18	1.88	1.84	1.52	1.30	1.24	1.10	0.31	0.86	0.73	0.12	0.30	0.50	–
Сумма	98.34	98.14	97.09	97.55	98.00	98.00	98.00	98.00	97.77	98.05	97.87	98.02	97.99	96.65	97.84	98.00	96.91
La	11.7	29.6	54.6	25.6	30.2	30.3	18.3	8.3	6.3	2.9	2.6	2.3	2.0	1.9	<0.5	1.3	<0.5
Ce	57.2	110	130	63.7	75.6	63.8	41.9	18.3	16.2	6.9	10.3	13.2	15.6	8.9	<5.0	<5.0	<5.0
Nd	62.3	86.2	71.3	43.6	59.7	41.4	28.1	9.5	12.5	6.8	16.8	9.8	14.5	9.2	<3.0	<3.0	<3.0
Sm	18.6	22.2	19.4	10.9	18.5	9.38	7.38	2.20	4.53	1.89	2.98	3.10	2.97	1.98	0.39	0.54	0.26
Eu	5.65	5.88	5.40	2.95	3.85	2.34	1.94	0.78	1.57	1.00	0.74	0.52	1.61	0.76	<0.05	0.58	0.13
Tb	3.74	4.53	4.37	2.16	2.93	1.14	0.83	0.36	0.91	0.61	0.54	0.89	0.69	0.47	0.13	0.59	0.46
Yb	10.0	12.4	13.2	6.28	12.2	4.06	2.81	0.80	3.93	2.65	2.20	1.77	2.80	2.00	1.47	9.15	2.32
Lu	1.49	1.84	1.57	0.96	1.85	0.60	0.40	0.10	0.61	0.39	0.32	0.26	0.41	0.29	0.27	1.50	0.37
Sc	83.8	81.1	81.9	56.2	82.5	52.9	53.1	58.3	71.7	57.6	51.9	69.7	71.1	50.1	54.6	79.5	68.7
Cr	58	148	97	78	77	<5	144	29	225	702	38	439	118	<10	29	495	448
Co	40.6	48.0	50.6	55.5	54.0	65.5	72.3	75.9	64.3	65.2	47.3	103.9	32.3	46.8	58.9	61.4	139.0
Hf	5.1	6.5	3.8	4.0	3.8	5.1	3.1	3.0	2.0	<0.5	0.72	3.6	1.8	<0.5	1.0	1.9	2.1
Ta	1.18	1.94	0.93	0.68	0.37	0.63	0.55	0.083	0.25	0.093	0.026	0.12	0.10	0.064	<0.01	0.23	0.064
Сумма РЗЭ	170.7	272.7	299.8	156.2	204.8	153.0	101.7	40.3	46.6	23.1	36.5	31.8	40.6	25.5	<10.8	<21.7	<12.0
La/Yb	0.79	1.62	2.81	2.77	1.68	5.07	4.42	7.05	1.09	0.74	0.80	0.88	0.49	0.65	<0.23	0.10	<0.15

Примечание. Проанализированы амфиболы из пород нюрундуканского мафического комплекса (обр. 3/4, 411, 483, 522, 487, 499, 23, 54/3, 12/3, 75, 133), лапландского гранулитового комплекса (обр. 632, Lap – 12, Lap – 13, C-7) и беломорского комплекса (обр. 14б, 82д). FeO* – суммарное железо. Прочерк – содержание элемента ниже порога чувствительности микрозонда. La / Yb отношение нормировано к хондриту C1 [20].

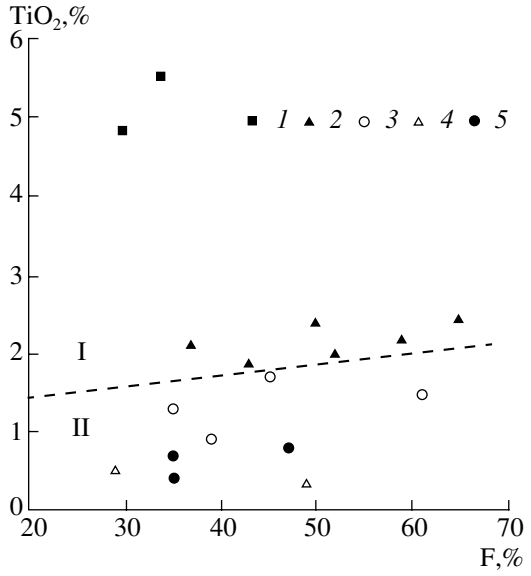

Рис. 1. Соотношение содержания TiO_2 и железистости F в исследованных амфиболах. I – поле составов гранулитовой фации, II – поле составов амфиболитовой фации.

Здесь и далее показаны составы амфиболов: керсутитов (*1*), амфиболов гранулитовой фации (*2*), высокотемпературной амфиболитовой фации (*3*), низкотемпературной амфиболитовой фации (*4*), метасоматических амфиболов (*5*).

нулитового комплекса и метасоматические амфиболы беломорского комплекса (Балтийский щит).

Содержание редких и РЗЭ в амфиболах определялось методом ИНАА А.А. Кольцовым (ИГГД РАН), составы амфиболов изучались на электронном микроанализаторе О.А. Яковлевой (ВСЕГЕИ) и М.Д. Толкачевым (ИГГД РАН).

Геологическая обстановка и условия метаморфизма. Докембрийский нюрундуканский мафический комплекс в Северо-Западном Прибайкалье характеризуется гетерогенностью строения – в нем тектонически совмещены двупироксеновые кристаллосланцы, ранний метаморфизм которых соответствовал условиям гранулитовой фации (770–850°C, 5–6 кбар), и полимигматизированные амфиболиты и габброиды [13]. Общим для мафических ортопород, слагающих нюрундуканский комплекс, явился наложенный низкобарический метаморфизм высокотемпературной амфиболитовой фации (650°, 4–5 кбар). И лишь вблизи контакта нюрундуканского комплекса со слабо метаморфизованным олокитским комплексом проходит Слюдянская зона рассланцевания, в пределах которой минеральные ассоциации фиксируют переход к высоким давлениям (580–630°C, 9–10.5 кбар). Только в пределах Слюдянской зоны амфиболизированные гранулиты, полевошпатовые амфиболиты и габброиды преобразуются в гранатовые амфиболиты, среди которых отмечены тела эклогитоподобных пород. На высокобарический этап метаморфизма был наложен регрессивный, как по температуре (550°C), так и по давлению (6–7 кбар), этап метаморфизма, сопровождавшийся широким развитием метасоматических процессов.

Кальциевые амфиболы присутствуют практически во всех типах пород нюрундуканского комплекса и являются сквозными минералами, что делает исследование их геохимии особенно важным для реконструкции метаморфической истории разных частей нюрундуканского комплекса. Амфиболы комплекса были предварительно изучены в отношении главных и редких элементов [13, 14].

Амфиболы из нюрундуканского комплекса сопоставляются с роговыми обманками из лапландского комплекса, породы которого испытали значительно более высокобарический гранулитовый метаморфизм (до 11–12 кбар) по сравнению с гранулитами нюрундуканского комплекса. Петрология пород и особенности составов минералов из лапландского комплекса, в том числе и использованных в данной работе, достаточно детально рассмотрены в [15–17].

Поскольку проявления метасоматоза в породах нюрундуканского комплекса трудно отличимы от низкотемпературных метаморфических процессов, авторами также были рассмотрены амфиболы из беломорского комплекса, происхождение которых по целому ряду признаков (текстурным особенностям, крупнозернистой структуре, полиминеральному составу породы и др.) однозначно является метасоматическим [14]. *P–T*-параметры образования метасоматических амфиболов из беломорского комплекса определены как 500–600°C и 6–7 кбар.

Особенности состава амфиболов. Приведенные в табл. 1 амфиболы разделяются на две большие группы по содержанию TiO_2 (рис. 1): амфиболы гранулитовой фации метаморфизма и более низкотемпературные амфиболы из пород амфиболитовой фации. Два амфибола из ортосланцев нюрундуканского комплекса (обр. 3/4, 411, таблица) с необычно высоким содержанием TiO_2 отнесены нами к керсутитам, возможно сохранившимся от магматического протолита. На рис. 1 фигуративные точки этих амфиболов заметно обособлены от других амфиболов гранулитовой фации метаморфизма. По соотношению TiO_2 и железистости F можно провести границу между амфиболами гранулитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма (рис. 1). Содержание TiO_2 давно используется при создании полуколичественных термометров [18 и др.]. При сравнении амфиболов гранулитовой фации с амфиболами высокотемпературной амфиболитовой, и далее, низкотемпературной амфиболитовой фации

и метасоматическими амфиболами особенно ощутимо понижается содержание TiO_2.

Два амфибола высокотемпературной амфиболитовой фации (обр. 487, 499, таблица) относятся к той основной части нюрундуканского комплекса, где высокобарический метаморфизм не был проявлен. Два других образца из этой же группы (обр. 23, 54/3), а также все низкотемпературные амфиболы и метасоматический амфибол (обр. 133) принадлежат к высокобарическим гранатовым амфиболитам Слюдянской зоны. Амфиболы из высокобарической зоны отличаются повышенными глиноземистостью (косвенным признаком повышения давления по [18]) и повышенным содержанием Na_2O, по сравнению с амфиболами гранулитовой фации. Содержание K_2O у амфиболов из Слюдянской зоны, наоборот, пониженное по сравнению с другими группами.

Амфиболы нюрундуканского комплекса значительно варьируют по железистости, это объясняется гетерогенностью строения комплекса и влиянием состава породы на железистость амфиболов [13]. Амфиболы лапландского комплекса в целом более железистые, чем амфиболы нюрундуканского комплекса.

Выделенные группы амфиболов также различаются и по содержанию редких элементов (таблица). В поведении Cr и Co закономерности обнаружить не удалось, как правило, содержание этих элементов в амфиболе сильно зависит от их содержания в породе [14]. Для этих элементов установлена отрицательная корреляция с содержанием Na_2O в амфиболе, а для Cr – положительная корреляция с кальциевостью породы. Низкобарические амфиболы в основном содержат больше Sc по сравнению с амфиболами из гранатовых парагенезисов. Зависимость же Sc от температуры не совсем ясна, хотя отмечена некоторая положительная корреляций содержаний Ti и Sc в амфиболах.

Наиболее информативными, помимо РЗЭ, которые будут рассмотрены в следующем разделе, оказались высокозарядные элементы (HFSE) – Hf, Ta. По совокупному содержанию этих элементов однозначно проводится граница между амфиболами гранулитовой и амфиболитовой фаций (рис. 2). Минимальные содержания Hf и Ta отмечены для низкотемпературных амфиболов, максимальные – для керсутитов. Амфибол из района Сальных Тундр лапландского комплекса (обр. С-7, таблица) по содержанию этих элементов близок к более низкотемпературным амфиболам, несмотря на достаточно высокое содержание TiO_2. Петрографические данные (появление зеленых пятен на бурой роговой обманке) и пониженная магнезиальность сосуществующего граната [15] свидетельствуют о начале процесса диафтореза для

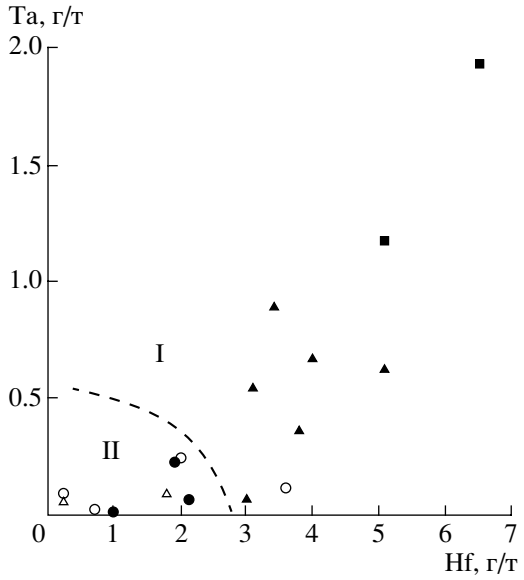

Рис. 2. Соотношение содержания Ta и Hf в амфиболах. Условные обозначения см. на рис. 1.

данной породы, что отразилось в редкоэлементном составе амфибола.

Содержание и распределение РЗЭ в амфиболах. Подсчет общего содержания РЗЭ в проанализированных амфиболах показал четкую зависимость суммарного содержания РЗЭ от степени метаморфизма амфиболсодержащих пород (таблица). В керсутитах среднее содержание РЗЭ составило 222 г/т; в амфиболах гранулитовой фации, за исключением диафторированного амфибола из обр. С-7, сумма РЗЭ в среднем равняется 183 г/т; в амфиболах из зоны амфиболитовой фации – 34 г/т; в метасоматических амфиболах среднее содержание РЗЭ не превышает 15 г/т. Таким образом, содержание РЗЭ в амфиболах существенно снижается с понижением температуры их образования. Исследование зонального амфибола из нюрундуканского комплекса на ионном микрозонде показало такую же закономерность в пределах одного зерна [19]. Центр зерна амфибола, являющийся бурой роговой обманкой с повышенным содержанием TiO_2, содержал количество РЗЭ, в 4–5 раз превышающее их содержание в кайме с преобладающими зелеными тонами плеохроизма.

Резкое падение суммы РЗЭ в метасоматических амфиболах, по всей вероятности связано не столько с понижением температуры, сколько с изменением минеральных ассоциаций в метасоматических породах, в которых, как правило, повышается содержание рутила, сфена, апатита и эпидота, концентрирующих легкие и средние РЗЭ [8]. Именно этими элементами обеднены формирующиеся во время метасоматоза амфиболы.

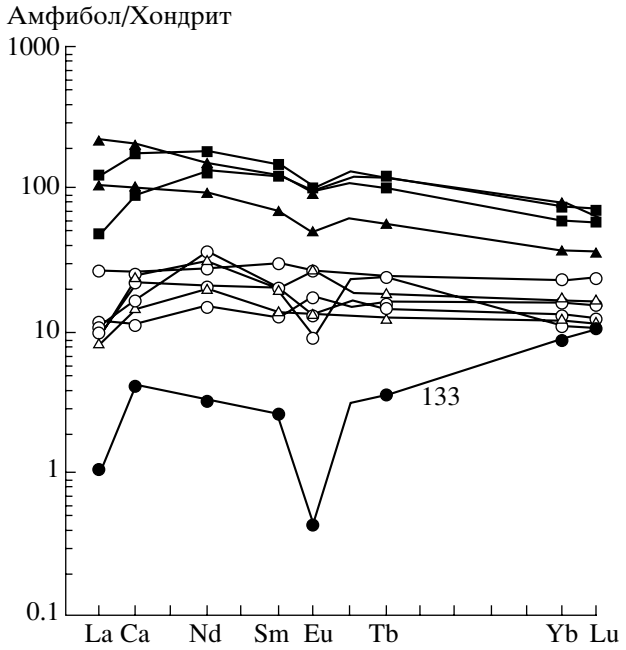

Рис. 3. Спектры распределения нормированных (по [20]) содержаний РЗЭ в амфиболах из пород нюрундуканского комплекса.

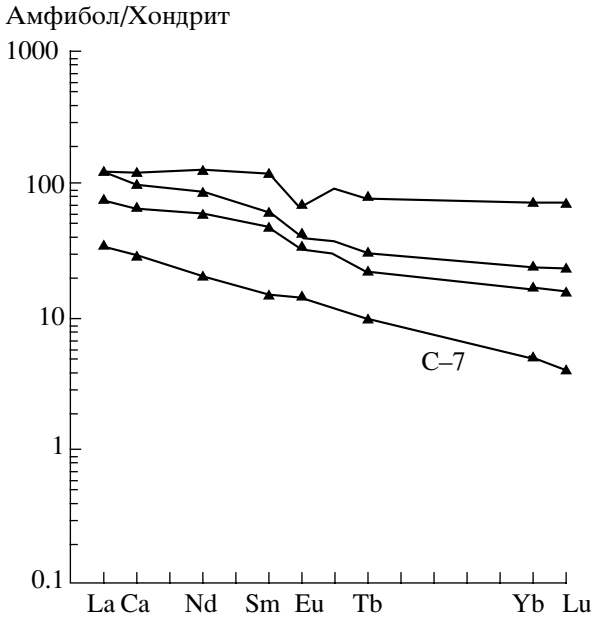

Рис. 4. Спектры распределения нормированных (по [20]) содержаний РЗЭ в амфиболах из пород лапландского комплекса.

Формы кривых распределения РЗЭ, нормированных к хондриту [20], различаются для разных групп амфиболов. Для керсутитов наблюдается пологое понижение от средних к тяжелым РЗЭ с положительной Nd аномалией (рис. 3). Амфиболы гранулитовой фации демонстрируют четкое понижение от легких к тяжелым РЗЭ, причем кривые распределения в амфиболах из нюрундуканского комплекса практически идентичны с кривыми для амфиболов из лапландского комплекса (рис. 4). Амфибол из района Сальных Тундр, по суммарному содержанию РЗЭ близкий к амфиболам амфиболитовой фации, имеет ту же форму кривой распределения, что и гранулитовые амфиболы, не испытавшие диафтореза, с пропорциональным снижением всего спектра РЗЭ.

Амфиболы нюрундуканского комплекса из зоны метаморфизма амфиболитовой фации, в отличие от гранулитовых амфиболов, показывают довольно ровное распределение РЗЭ, в 10–40 раз превышающее хондритовое (рис. 3). Значительные колебания содержаний РЗЭ в этих амфиболах наблюдаются лишь в области средних РЗЭ.

Наибольшие вариации в содержании РЗЭ демонстрируют амфиболы из метасоматически измененных пород (рис. 5): положительные аномалии по Ce и отрицательные по Sm и Eu. Все три метасоматические амфибола дают в общем повторяющиеся формы кривых распределения, отличаясь друг от друга только общим содержанием РЗЭ.

На основе изучения распределения РЗЭ в минералах эклогитов, где структурные и петрологические данные позволяют считать сосуществующие минералы равновесными, были выведены типовые кривые распределения РЗЭ в гранате и клинопироксене [5 и др.]. Эти кривые образуют пересечение в области средних РЗЭ с накоплени-

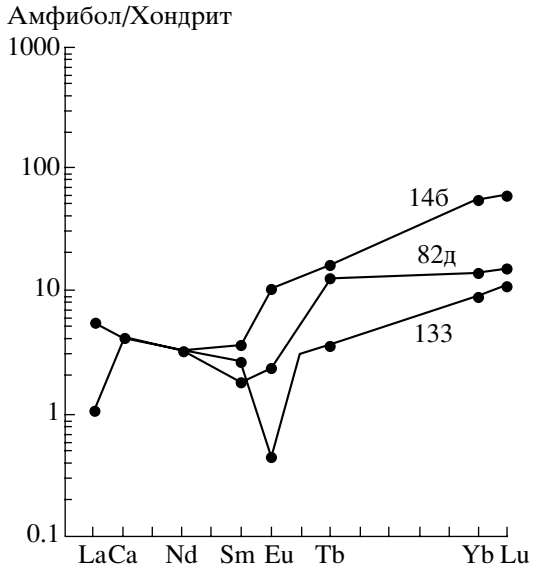

Рис. 5. Спектры распределения нормированных (по [20]) содержаний РЗЭ в метасоматических амфиболах из пород беломорского и нюрундуканского комплексов.

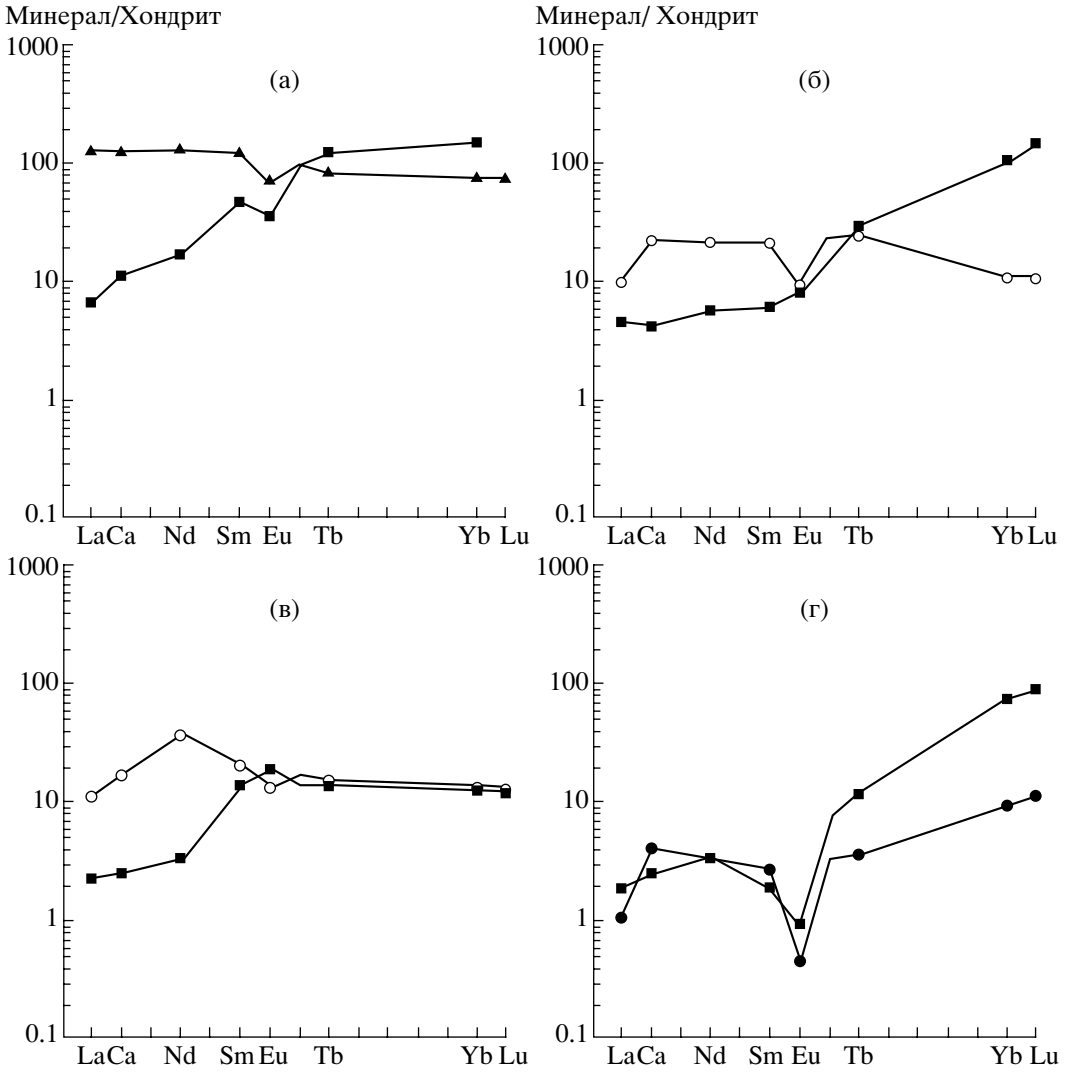

Рис. 6. Спектры распределения нормированных (по [20]) содержаний РЗЭ в сосуществующих амфиболах и гранатах: а – из обр. 632; б – из обр. 54/3; в – из обр. 23; г – из обр. 133. Составы гранатов показаны черными квадратами.

ем тяжелых РЗЭ в гранате (La/Yb отношение меньше 1) и преимущественной концентрацией легких РЗЭ в клинопироксене (La/Yb отношение больше 1). Такой же тип распределения установлен и для пары гранат–амфибол в основном кристаллическом сланце гранулитовой фации (рис. 6а).

Для нюрундуканского комплекса, где ассоциация граната с амфиболом присутствует только в породах амфиболитовой фации, такое закономерное распределение РЗЭ между сосуществующими минералами, близкое к распределению в гранулитах, наблюдается только в редких случаях (рис. 6б). Анализ распределения РЗЭ в паре гранат–амфибол для обр. 23 (рис. 6в) показывает, что амфибол, образованный при температурах амфиболитовой фации, имеет обычное для амфиболов понижение содержания от легких к тяжелым РЗЭ, а гранат повторяет кривую для амфибола в области средних и тяжелых РЗЭ. Гранат в этой породе присутствует в виде крупных порфиробластов с включениями более раннего амфибола. Нетипичная для кальциевых гранатов амфиболитовой фации форма распределения РЗЭ, наряду с петрографическими данными, говорит в пользу предположения о развитии граната по амфиболу с унаследованным от последнего распределением РЗЭ в гранате. Химическое равновесие между двумя этими минералами, скорее всего, так и не было достигнуто.

Кривая распределения РЗЭ в амфиболе из метасоматической породы (обр. 133) повторяет форму распределения РЗЭ в гранате с четко выраженной Eu аномалией и повышением содержания от средних к тяжелым РЗЭ (рис. 6г). Здесь, несомненно имеет место образование амфибола по гранату с унаследованностью в распределении

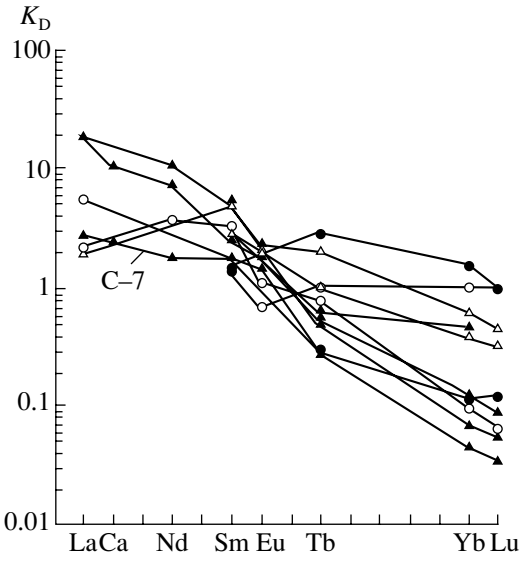

Рис. 7. Коэффициенты распределения K_D редкоземельных элементов между сосуществующими амфиболами и гранатами.

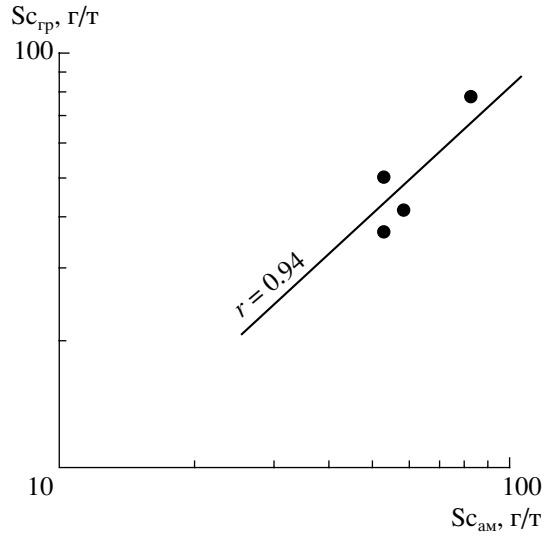

Рис. 8. Распределение Sc между гранатом (гр) и амфиболом (ам) для пород гранулитовой фации.

РЗЭ. Подобное наследование формы распределения РЗЭ первичного минерала амфиболом, развивающимся по гранату или клинопироксену, было отмечено при изучении наложенного метаморфизма в эклогитах и океанических габбро [7, 8, 21].

Повторяемость коэффициента распределения редких и РЗЭ между гранатом и сосуществующим минералом (клинопироксеном, амфиболом) для различных образцов из сходных по составу пород может служить критерием равновесия двух минералов [5, 9, 10 и др.]. Как показал Р. Кретц, коэффициенты распределения редких и РЗЭ между сосуществующими минералами зависят в основном от термодинамических условий, а их близость для однотипных пород означает достижение или приближение к равновесию [9]. Чем больше вариации в величинах коэффициентов распределения, тем больше отклонение от равновесия. Коэффициенты распределения РЗЭ между амфиболом и гранатом дают близкие значения для гранулитов лапландского комплекса (рис. 7). K_D для гранулитов испытывают закономерное снижение на два порядка от легких к тяжелым РЗЭ. Такие же значения коэффициентов распределения получаются для сосуществующих граната и амфибола из гранулитового комплекса Скоури, Шотландия [11]. В лапландских гранулитах исключением является обр. С-7 – с пониженными значениями K_D для легких РЗЭ, близкими к коэффициентам распределения для минералов амфиболитовой фации (рис. 7). Данная особенность, наряду с низким общим содержанием РЗЭ в амфиболе (обр. С-7, таблица), свидетельствует о более низкотемпературном неравновесном метаморфизме, не нашедшем отражения в составе амфибола по главным элементам.

Коэффициенты распределения РЗЭ между амфиболом и гранатом для пород нюрундуканского комплекса характеризуются значительным разбросом значений (рис. 7), что говорит о существенном отклонении от равновесия в большинстве амфибол-гранатовых пар амфиболитовой фации. Примечательно, что какая-либо корреляция в распределении Sc между гранатом и амфиболом для пород амфиболитовой фации отсутствует ($r = 0.18$), в то время как для гранулитов распределение Sc приближается к идеальному ($r = 0.94$, рис. 8).

Обсуждение результатов и выводы. Как было установлено ранее, нюрундуканский комплекс испытал несколько последовательно сменяющихся этапов метаморфизма с общей тенденцией понижения температуры при отличающемся давлении в разных частях комплекса. Все этапы метаморфизма от гранулитовой до низкотемпературной амфиболитовой фации нашли свое отражение в составе амфиболов по главным и редким элементам.

В породах гранулитовой фации нюрундуканского комплекса керсутиты и коричневые роговые обманки выделяются своей высокой титанистостью и общим содержанием РЗЭ, более чем в 100 раз превышающим хондритовое. Несколько отличается от коричневых роговых обманок форма распределения РЗЭ в керсутитах. Необычно высокая титанистость керсутитов, а также находка этих амфиболов в породах дайкового комплекса позволяет сделать предположение, что керсутиты сохранились от магматического этапа развития нюрундуканского комплекса. Следует отметить, что амфиболы из гранулитов нюрундуканского

комплекса имеют весьма сходное распределение и суммарное содержание РЗЭ с гранулитовыми амфиболами из пород лапландского комплекса, где давление при гранулитовом метаморфизме было намного выше, чем в нюрундуканском комплексе. Можно сделать вывод, что содержание и распределение РЗЭ в амфиболах, как и отношение La/Yb, зависит только от температуры метаморфизма и не зависит от давления.

Амфиболы следующего этапа метаморфизма (высокотемпературной амфиболитовой фации) характеризуются более низкой суммой РЗЭ, в 10–30 раз превышающей хондритовую, и резко пониженным отношением La/Yb, как в пределах Слюдянской зоны высокобарического метаморфизма, так и вне ее. Еще более низкое содержание РЗЭ свойственно голубовато-зеленым амфиболам, относящимся к заключительному этапу метаморфизма. Состав этих амфиболов отражает их формирование при более низких параметрах метаморфизма. Амфиболы двух этапов амфиболитового метаморфизма обнаруживают более или менее ровное распределение тяжелых РЗЭ и весьма неустойчивое, с пиками и отрицательными аномалиями – в области легких и средних РЗЭ (рис. 3). Поскольку наиболее значительные отклонения от ровного выдержанного распределения РЗЭ отмечаются в метасоматических амфиболах, можно предположить, что кривые распределения в данных амфиболах отражают начало метасоматических преобразований, связанных с обилием флюидов в зонах рассланцевания.

При изучении геохимии минералов из эклогитов Р. Сасси с соавторами обращают внимание на изменения в распределении РЗЭ в амфиболе в зависимости от того, по какому минералу развивается амфибол [8]. В случае его образования за счет граната происходит обогащение амфибола тяжелыми РЗЭ. Эти наблюдения полностью подтверждают амфиболы нюрундуканского комплекса. Нами установлены случаи, когда гранат развивается по амфиболу с повторением амфиболового распределения в области как средних, так и тяжелых РЗЭ.

Кривые распределения РЗЭ в метасоматических амфиболах сильно отличаются от кривых для амфиболов главной стадии метаморфизма. Кроме того, именно в метасоматитах часто встречаются амфиболы, кривые распределения РЗЭ в которых определенно наследуют распределение РЗЭ в сосуществующих с ними гранатах, за счет которых они и образовались. Анализ таких соотношений дает возможность устанавливать последовательность минералообразования.

Проведенное исследование геохимии РЗЭ в метаморфических кальциевых амфиболах позволяет сделать следующие выводы:

1. По суммарному содержанию РЗЭ и La/Yb отношению однозначно различаются амфиболы гранулитовой и амфиболитовой фаций метаморфизма вне зависимости от давления.

2. Метасоматические амфиболы отличаются от метаморфических аномально низким суммарным содержанием РЗЭ и La/Yb отношением, а также экзотическими и непостоянными кривыми распределения РЗЭ.

3. Сравнение кривых распределения РЗЭ в амфиболах и сосуществующих минералах, в частности, в гранатах, позволяет устанавливать последовательность минералообразования благодаря способности вторичного минерала наследовать содержание и особенности распределения РЗЭ в раннем минерале.

4. Равновесие по редким и РЗЭ полнее всего достигается между минералами высокотемпературных комплексов гранулитовой фации, что выражается в близких величинах коэффициентов распределения для минеральных пар из сходных по составу групп пород. В зонах более низкотемпературного повторного метаморфизма и рассланцевания равновесие между сосуществующими минералами достигается гораздо реже, что объясняется относительно большой скоростью вторичных преобразований, высокой проницаемостью подобных зон для метаморфических флюидов и разной степенью подвижности РЗЭ.

Авторы признательны Н.Е. Козлову и А.В. Кротову за предоставление образцов пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Другова Г.М., Скублов С.Г., Вревский А.Б., Козлов Н.Е.* Распределение редкоземельных элементов в гранатах Лапландского гранулитового пояса и сопредельных территорий // Геохимия. 2001. № 2. С. 232–237.
2. *Скублов С.Г., Другова Г.М., Вревский А.Б.* Редкоземельные элементы в гранатах из пород Лапландского гранулитового пояса // Записки ВМО. 2001. № 1. С. 66–71.
3. *Dale J., Holland T., Powell R.* Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende // Contribs Mineral. and Petrol. 2000. V. 140. P. 353–362.
4. *Bottazzi P., Tiepolo M., Vannucci R. et al.* Distinct site preferences for heavy and light REE in amphibole and the prediction of $^{Amph/L}D_{REE}$ // Contribs Mineral. and Petrol. 1999. V. 137. P. 36–45.
5. *Tribuzio R.* Distribution of rare earth and trace elements in the main mineral phases of the meta-Fe-gabbros from Ligurian ophiolites: crystal-chemical controls and petrogenetic implications // Plinius. 1992. № 7. P. 115–120.
6. *Zanetti A., Vannucci R., Oberti R., Dobosi G.* Trace-element composition and crystal-chemistry of mantle amphiboles from the Carpatho-Pannonian Region // Acta Vulcanologica. 1995. V. 7. P. 265–276.

7. *Cortesogno L., Gaggero L., Zanetti A.* Rare earth and trace elements in igneous and hightemperature metamorphic minerals of oceanic gabbros (MARK area, Mid-Atlantic Ridge) // Contribs Mineral. and Petrol. 2000. V. 139. P. 373–393.

8. *Sassi R., Harte B., Carswell D.A., Yujing H.* Trace element distribution in Central Dabie eclogites // Contribs Mineral. and Petrol. 2000. V. 139. P. 298–315.

9. *Kretz R., Campbell J.L., Hoffman E.L. et al.* Approaches to equilibrium in the distribution of trace elements among the principal minerals in a high-grade metamorphic terrane // J. Metam. Geol. V. 17. P. 41–59.

10. *Loock G., Stosch H.-G., Seck H.A.* Granulite facies lower crustal xenoliths from the Eifel, West Germany: petrological and geochemical aspects // Contribs Mineral. and Petrol. 1990. V. 105. P. 25–41.

11. *Pride C., Muecke G.K.* Rare earth element distributions among coexisting granulite facies minerals, Scourian complex, NW Scotland // Contribs Mineral. and Petrol. 1981. V. 76. P. 463–471.

12. *Sorensen S.S., Grossman J.N.* Enrichment of trace elements in garnet amphibolites from a paleo-subduction zone: Catalina Schist, southern California // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1989. V. 53. P. 3155–3177.

13. *Скублов С.Г.* Типохимизм амфиболов нюрундуканского комплекса (Северо-Западное Прибайкалье) // Записки ВМО. 1993. № 6. С. 82–88.

14. *Другова Г.М., Скублов С.Г., Астафьев Б.Ю. и др.* Особенности распределения микроэлементов в кальциевых амфиболах метаморфических пород докембрия // Записки ВМО. 1998. № 5. С. 91–104.

15. *Скублов С.Г., Другова Г.М., Вревский А.Б. и др.* Редкоэлементный состав гранатов из пород Лапландского гранулитового пояса (Балтийский щит) // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2000. Вып. 2 (№ 14). С. 24–34.

16. *Другова Г.М., Скублов С.Г., Козлов Н.Е., Порицкая Л.Г.* Редкоэлементный состав метаморфических минералов из пород Лапландского гранулитового пояса (Балтийский щит): II. Пироксены, амфиболы, биотиты // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2001. Вып. 3 (в печати).

17. *Перчук Л.Л., Кротов А.В., Геря Т.В.* Петрология амфиболитов пояса Тана и гранулитов Лапландского комплекса // Петрология. 1999. Т. 7. № 4. С. 356–381.

18. *Ernst W.G., Liu J.* Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB – A semiquantitative thermobarometer // Amer. Mineral. 1998. V. 83. P. 952–969.

19. *Skublov S.* Trace element zoning in metamorphic minerals // The Mineral. Record. 2001. V. 32. № 1. P. 43.

20. *McDonough W.F., Sun S.-s.* The composition of the Earth // Chem. Geology. 1995. V. 120. P. 223–253.

21. *Rodriguez J., Tribuzio R., Ibarguchi J.I.G. et al.* Origin and trace element composition of poikiloblastic Na–Ca amphibole in continental eclogites (Malpica-Tui, NW Spain) // J. Conference Abstracts (EUG 10). 1999. V. 4. № 1. P. 705.