

УДК 550.42 (552.11)

ПЕТРОХИМИЯ, РЕДКИЕ И РАССЕЯННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОРОДАХ МАССИВА ДЕНЕЖКИН КАМЕНЬ (ПЛАТИНОНОСНЫЙ ПОЯС УРАЛА)



А. А. Ефимов, Ю. Л. Ронкин, Г. А. Лепихина

Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург,
y-ronkin@mail.ru, glepikhina@gmail.com

По 170 пробам из субширотного разреза горячего меланжа массива Денежкин Камень (Платиноносный пояс Урала) длиной 7910 метров изучены закономерности распределения редких и рассеянных элементов с помощью FS HR ICP-MS Element 2, отражающие процесс пластической деформации, тектонического и химического смешения двух твердых исходных элементов — дунит-пироксенитового и оливин-габбрового. Выявленные геохимические градиенты увязываются со стратиграфией блока, причем абсолютное большинство микроэлементов обнаруживает явную тенденцию к накоплению в нижней 3-километровой зоне разреза, сложенной породами с резко выраженной порфирикластической структурой.

Ключевые слова: платиноносный пояс Урала, массив Денежкин Камень, редкие и рассеянные элементы.

PETROCHEMISTRY, TRACE ELEMENTS OF THE DENEZHKIN KAMEN' ROCKS (THE PLATINUM-BEARING BELT OF THE URALS)

A. A. Efimov, Y. L. Ronkin, G. A. Lepikhina

Zavaritskii Institute Geology and Geochemistry of the Urals branch of the Russian Academy Sciences, 620075, Ekaterinburg

The 170 samples from 7910 meters profile long of the massif of Denezhkin Kamen' (the Platinum-Bearing Belt of the Urals) were selected for determination of trace elements concentration by FS HR ICP-MS Element 2. Results of this analysis is identification of reflecting process of plastic deformation, tectonic and chemical mixture of two solid initial units — the dunit-pyroxenic and olivin-gabbro. The revealed geochemical gradients correlate with a block stratigraphy, and the absolute majority of trace elements concentrations finds an obvious tendency to accumulation in the bottom 3-km zone of the section put by sharply expressed porphyroclastic structure rocks.

Keywords: the platinum-bearing belt of the Urals, Denezhkin Kamen' massif, trace elements.

Массив Денежкин Камень является одним из фрагментов меридионально ориентированной последовательности из 14-ти (рис. 1, А) ультрабазит-базитовых комплексов, представляющих Платиноносный пояс Урала [1, 2, 7–11, 12]. При геологическом картировании массива Денежкин Камень в свое время [3] был выделен блок горячего меланжа размером около 15 x 15 км, контактирующий с дунитовым блоком Желтой Сопки (рис. 1, Б). Тектоническая граница между двумя блоками (древний горячий тектонический шов мощностью около 200 м, сложенный blastomylonитами) весьма отчетлива. Она устанавливается, в числе прочего, по составу плагиоклаза: в породах шва это исключительно анортит, в тылаитах — лабрадор. После выходов шва начинаются отделенные от них менее чем 50-метровым закрытым промежуток выходы тылаитов, постепенно сливающиеся в скальный

гребень, продолжающийся до главного хребта Денежкина Камня.

В тектоническом отношении блок горячего меланжа представляет собой монолит без признаков поздних внутренних несогласий или разновременных магматических внедрений, сложенный стратифицированной толщей высокотемпературных тектонитов, в которой наблюдается тонкое переслаивание, реже хаотическое чередование пород с постепенными переходами между ними. Преобладают порфирикластические габбро — тылаиты, состоящие из плагиоклаза An_{50} — An_{80} , клинопироксена, оливина и магнетита в самых различных количественных соотношениях, в меньшем количестве присутствуют «обычные» (гранобластовые) оливин-анортитовые габбро, клинопироксениты, верлиты, железистые дуниты (метадуныты) и оливиниты, слагающие согласные с полосчатостью тектонические пласты и линзы.

Незамкнутая концентрическая центриклиальная структура блока выражена серией пологих дуг, обращенных выпуклой частью к северо-западу. Во внешней дуге полосчатость падает под углами от 20 до 60° к центру массива. По мере приближения к последнему ее падение становится более крутым, почти вертикальным. Отчетливо выделяются (с запада на восток) «низ» и «верх», т. е. можно говорить о стратиграфии разреза. Таким образом, почти 8-километровый разрез всей толщи представляет собой моноклиаль с закономерным изменением углов падения полосчатости, причем интенсивность катаклаза возрастает по разрезу сверху вниз. Эквигранулярная (гранобластовая) микроструктура пород верхней части разреза постепенно сменяется резко выраженной порфирикластической в породах его основания, особенно в нижней 3-километровой зоне. Здесь порфирикласты часто приобретают

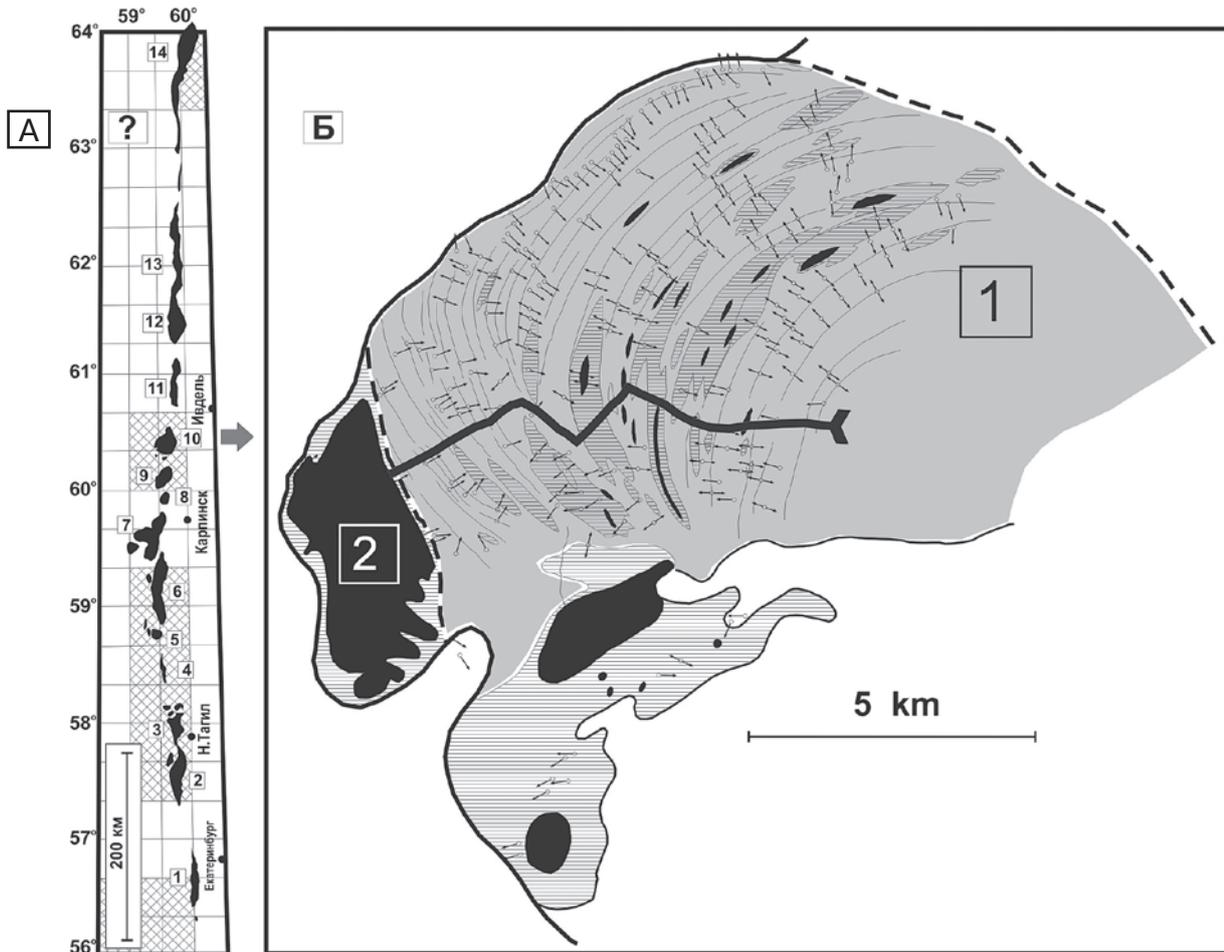


Рис. 1: А — контуры массивов Платиноносного пояса Урала [Ефимов, 2010 и др.]: 1 — Ревдинский, 2 — Тагильский, 3 — Баранчинский, 4 — Арбатский, 5 — Качканарский, 6 — Павдинский, 7 — Кытлымский, 8 — Княспинский, 9 — Кумбинский, 10 — Денежкинский, 11 — Помурский, 12 — Чистопский, 13 — Ялпинг-Ньерский, 14 — Хорасюрский. Заштрихованные прямоугольники отображают листы, по которым выполнена геологическая съемка; Б — фрагмент схемы геологического строения зоны массива Денежкин Камень (по данным съемки масштаба 1:50000 А. А. Ефимова и Л. П. Ефимовой, 1960—1963 гг.): серая заливка — тьялиты и оливиновые габбро, штриховка — клинопироксениты, черное — дунитовые тела; 1 — дунит-пироксенит-тьялитовый блок горячего меланжа, 2 — автономное дунит-пироксенитовое тело Желтой Сопки, стрелки и тонкие субпараллельные линии — структурные элементы. Жирной черной ломаной линией обозначен разрез, результаты изучения которого приведены в тексте статьи

явно обломочные формы, увеличивается объем мелко- или тонкозернистой матрицы.

Петрохимия

Был систематически опробован широтный разрез всего блока протяженностью почти 8 км, от контакта с дунитовым телом Желтой Сопки через главную вершину хребта Денежкина Камня до восточного его подножия (рис. 1, Б), привязанный к характерным топографическим пунктам. Штуфные пробы отбирались в среднем через 50 м, редко более, а в некоторых деталях участках чаще. Всего было отобрано около 170 валовых проб, для 157 из которых методами «мокрой химии» были выполнены полные химические анализы. При общей упорядоченности геологической структуры блока химические (а следовательно, и петрографические) разности пород чередуются по разрезу совершенно хаотично,

незакономерно. В этом можно убедиться на примере содержания нормативного плагиоклаза, символизирующего содержание петрогенного оксида Al_2O_3 . Амплитуда колебаний Al_2O_3 — от 0.5 до 27 мас. % (в породах, содержащих модалный плагиоклаз в количестве от 5 до 27 мас. %), при этом коэффициент корреляции между нормативным содержанием плагиоклаза и положением точек опробования в разрезе практически равен нулю ($r = 0.03$). В то же время состав плагиоклаза в мол. % An образует хорошо выраженный тренд ($r = 0.72$) — от анортита в верхах разреза до лабрадора в основании. То же относится и к другим породообразующим оксидам и минералам, их содержащим (например, к MgO и составу оливина). Закономерность все время одна и та же: массы компонентов (экстенсивная характеристика пород) ведут себя хаотично, составы минералов (определяемые, как мож-

но думать, интенсивными параметрами системы) — упорядоченно, что говорит о том, что вся толща близка к состоянию химического равновесия [6]. Однако на статистических диаграммах хаотичная серия горных пород, слагающих блок, составляет совершенно непрерывный химический ряд, не имеющий, однако, особого генетического смысла. Из него лишь следует, что в составе серии присутствует бесчисленное количество петрографических разностей пород в рамках минеральной ассоциации оливин—клинопироксен—плагиоклаз—магнетит.

Отрицательные коэффициенты корреляции указывают на возрастание концентраций компонентов к основанию, а положительные — к верхам разреза. Для петрогенных оксидов увеличение вверх по разрезу наблюдается для FeO ($r = 0.4$), вниз по разрезу — для Na_2O (-0.47), SiO_2 (-0.41), TiO_2 (-0.22), K_2O (-0.21). В габбро наблю-



дается заметная положительная пространственная корреляция для Al_2O_3 (0.43) и CaO (0.22), отрицательная — для SiO_2 (–0.61), Na_2O (–0.39), MgO (–0.30) и в некоторой степени для K_2O (–0.18). Это означает, что вверх по разрезу габбро имеют тенденцию становиться более лейкократовыми и известковистыми, а вниз по разрезу — более богатыми MgO и щелочами. Эти химические градиенты согласуются с составом пород и минералов (меланократовые тылаиты, кислый плагиоклаз и биотит в основании, анортитовые габбро в верхней части разреза).

Геохимия разреза

Для 152 валовых проб и для 41 мономинеральной фракции плагиоклаза рентгенофлуоресцентным (XRF) методом выполнены анализы на Sr и Rb, а для 43 валовых проб методом ICP MS [12] — анализы на редкие элементы.

В таблице приводятся: 1) амплитуды содержаний микроэлементов в породах разреза; 2) коэффициенты линейной корреляции ($\pm r$) концентраций микроэлементов с измеренными расстояниями по разрезу (как и в таблице, отрицательные коэффициенты указывают на возрастание концентраций к основанию, а положительные — к верхам разреза); 3) коэффициенты корреляции концентраций элементов, отчетливо связанных между собой; 4) наконец, коэффициенты корреляции концентраций Sr, Ba и Sc с количествами главных породообразующих минералов — плагиоклаза и клинопироксена.

Линейная корреляция при $r < 0.3$ принимается как слабая, при $0.7 < r > 0.3$ — как средняя, а при $r > 0.7$ — как сильная. Концентрации 18 элементов из 35 (колонка 2 в таблице — TR, Rb, Zr, Hf, Be, Y, Li, Ba, Na, P, Ti, B, Sr, Mn, V, Ga, Nb, Ag) обнаруживают увеличение отрицательной корреляции к основанию разреза в пределах средней, а в некоторых случаях, например для группы PЗЭ, она приближается к сильной ($r = -0.69$). Еще четыре элемента — In, Zn, Cs, Cu — обнаруживают слабую (от –0.20 до –0.27) отрицательную корреляцию, а девять элементов (Mo, Ta, Bi, W, Tl, Th, Cd, Se, As) демонстрируют скорее отсутствие пространственной корреляции как таковой. Лишь четыре элемента — Sc, Pb, Co, Cr — обнаруживают положительную корреляцию, приближающуюся к средней (~0.20). Таким образом, геохимические градиенты связаны со стратиграфией, причем абсолютное большинство микроэлементов обнаруживает явную тенденцию к накоплению в основании разреза (рис. 2).

Пространственные геохимические зависимости обычно лучше аппроксимируются не линейными, а логарифмическими функциями, отражающими более быстрое и резкое возрастание концентраций вниз по разрезу. Сумма PЗЭ, например, возрастает от 4–5 г/т в верхней части до 20–25 г/т в основании разреза (логарифмический $r = -0.81$). По уровню нормированных концентраций PЗЭ (1–10 хондрита) и по конфигурации графиков (рис. 3) породы разреза образуют довольно тесную группу, характеризующуюся невысоким

(1.5–2) отношением La/Yb при некотором преобладании средних PЗЭ. Низкие содержания PЗЭ (около 0.8 хондрита) свойственны оливиновым габбро, наиболее высокие (10 и выше) — порфиороклатическим тылаитам нижней 3-километровой зоны. Поля оливиновых габбро и тылаитов связаны постепенным переходом. Весь диапазон содержаний PЗЭ в пироксенитах вписывается в поле оливиновых габбро. Особняком стоят только метадуныты с низкими (около 0.3 хондрита) концентрациями PЗЭ. Всем плагиоклазсодержащим породам свойственна Eu-аномалия, значения которой хорошо коррелируют с количеством плагиоклаза.

Сильные парные связи между некоторыми элементами (например, TR–Y, Zr–Hf) хорошо известны и в данном случае лишь подтверждаются (табл. 1, колонка 7).

Особого внимания заслуживает очень сильная корреляция двух микроэлементов с содержаниями минеральных фаз: Sr ($r = 0.93$) с содержанием плагиоклаза, а Sc ($r = 0.91$) с содержанием клинопироксена.

В породах разреза плагиоклаз является практически монополярным минералом-концентратором Sr, а клинопироксен — Sc. Валовые содержания Sr (амплитуда — от 5 до 1278 г/т) обнаруживают корреляцию средней силы ($r = -0.38$) с положением в разрезе. Однако это происходит в основном из-за увеличения не количества плагиоклаза, а концентраций Sr в плагиоклазе, которое изменяется по логарифмическому закону — от 800 г/т в оливиновых габбро верхней

Пространственные тренды и коэффициенты корреляции (r) между валовыми содержаниями микроэлементов и расстояниями по разрезу

Пространственная корреляция						Статистика, $\pm r$
Элемент	Амплитуда, г/т	$\pm r$	Элемент	Амплитуда, г/т	$\pm r$	
1	2	3	4	5	6	7
TR	1.1–40.5	–0.69	In	0.006–0.11	–0.27	TR–Y(0.90)
Rb	0.06–2.5	–0.67	Zn	19–95	–0.25	Al–Ga(0.90)
Zr	0.8–24	–0.61	Cs	0.04–0.23	–0.21	Zr–Hf(0.86)
Hf	0.04–1.01	–0.60	Cu	3–800	–0.20	Ti–V(0.81)
Be	0.007–0.5	–0.59	Mo	0.2–2.2	–0.03	Li–Be(0.61)
Y	0.57–23.1	–0.58	Ta	0.005–1.94	–0.03	
Li	0.83–8.61	–0.55	Bi	0.005–0.405	–0.03	
Ba	1.6–155	–0.53	W	0.07–3.1	0.00	
Na	205–26975	–0.48	Tl	0.04–2.5	0.04	
P	8–2241	–0.48	Th	0.001–2.5	0.04	
Ti	193–5600	–0.48	Cd	0.02–0.17	0.06	
B	0.43–17.8	–0.46	Se	0.01–0.11	0.08	
Sr	5–1278	–0.38	As	0.08–1.95	0.10	Fsp–Sr (0.93)
Mn	310–2550	–0.34	Sc	9–170	0.18	Fsp–Ba (0.62)
V	26–887	–0.32	Pb	0.4–40	0.24	Cpx–Sc (0.91)
Ga	0.78–22.3	–0.31	Co	17–182	0.25	
Nb	0.3–1.6	–0.31	&	13–8000	0.25	
Ag	0.02–0.37	–0.29				

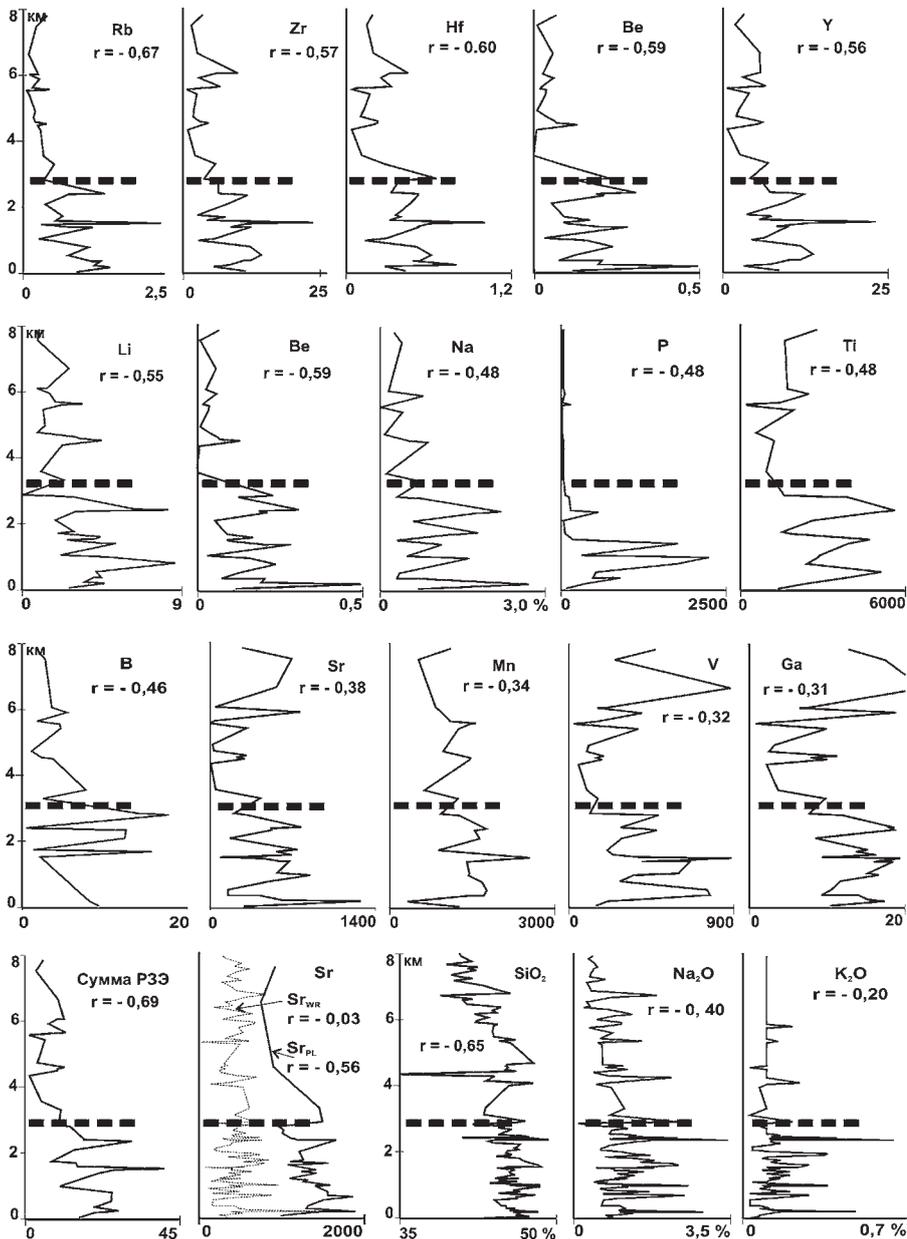


Рис. 2. Графики, иллюстрирующие поведение микроэлементов и некоторых петрогенных элементов (Si, Na и K) по разрезу Денежского блока. Вертикальная ось каждого графика — расстояние от начала разреза, горизонтальная — концентрация микроэлемента в г/т (для петрогенных элементов — в мас. %). На каждом графике обозначен коэффициент линейной корреляции между концентрацией и расстоянием по разрезу. Жирная штриховая линия на каждом графике обозначает верхнюю границу нижней 3-километровой зоны разреза, сложенной породами с особо ярко выраженной порфиороклатической микроструктурой

части разреза до 1900 г/т в порфиороклатических тылаитах основания разреза [5]. Таким образом, в разрезе Денежского блока зафиксирована не единая равновесная эквипотенциальная система Sr, а градиент Sr, направленный к основанию разреза.

Обсуждение. Химические особенности разреза

Упорядоченное расположение точек валовых составов на диаграммах $MgO-CaO-Al_2O_3$ резко контрастирует с совершенно незаконномерным распределением тех же составов в разрезе. Если бы непрерывный

химический тренд был результатом фракционирования магмы, он должен был коррелировать со стратиграфией полосатой толщи, в которой, как обычно считают, запечатлен порядок осадения кумулятивных слоев. Однако, с другой стороны, если бы имело место чисто механическое смешение двух исходно дискретных элементов горячего автоклатического меланжа, следовало бы ожидать появления бимодальной или даже тримодальной химической серии. Однако этого нет, и можно предположить, что непрерывность химического тренда обусловлена другой при-

чиной — биметасоматическим обменом, т. е. химическим смешением тех же элементов горячей тектонической смеси (дунит-пироксениновый конечный член обогащался в первую очередь Al, а оливин-габбровый — Mg). По-видимому, это привело в конечном счете к появлению на диаграммах непрерывного петрографического ряда без признаков дискретности — от оливиновой породы до пироксенита, габбро и анортозита, а в разрезе — хорошо известной картины непрерывных и многократных петрографических переходов.

Ряд химических особенностей находится в резком противоречии с идеей фракционирования, но не находит адекватного объяснения и в схеме простого смешения. Например, аномальный градиент состава плагиоклаза: нижние горизонты разреза содержат наиболее кислый новообразованный плагиоклаз, а выше располагается мощная толща пород с анортитом. Факт местного обогащения щелочами, понижения основности плагиоклаза и появления биотита в тылаитах отмечен давно [4, с. 74], но не находил объяснения. Поскольку исходные компоненты горячей смеси не имели необходимого внутреннего ресурса щелочей и кремнезема для образования кислого плагиоклаза, следует предполагать, что в эпоху образования горячего меланжа имел место привнос вещества из внешнего источника. Об источнике привноса указанных петрогенных компонентов можно говорить пока только в предположительной форме. Но, во всяком случае, им не могло быть современное окружение массива, да и вообще материал верхней коры, судя по низким отношениям $^{87}Sr/^{86}Sr$ в породах разреза. Не могла быть зоной проницаемости для агента метасоматоза и область горячего шва, поскольку многочисленные габбровые жилы в дунитах Желтой Сопки содержат анортит и практически не содержат калия. Вероятно предположение о привносе Na, K и Si из внешнего источника в ранние этапы эволюции блока горячего меланжа, до его объединения с блоком Желтой Сопки.

Сказанное о привносе из внешнего источника в еще большей степени относится к микроэлементам. Ясно, что исходные элементы горячего меланжа не имели необходимого внутреннего ресурса микроэлементов. Установленные геохимические градиенты связаны со страти-

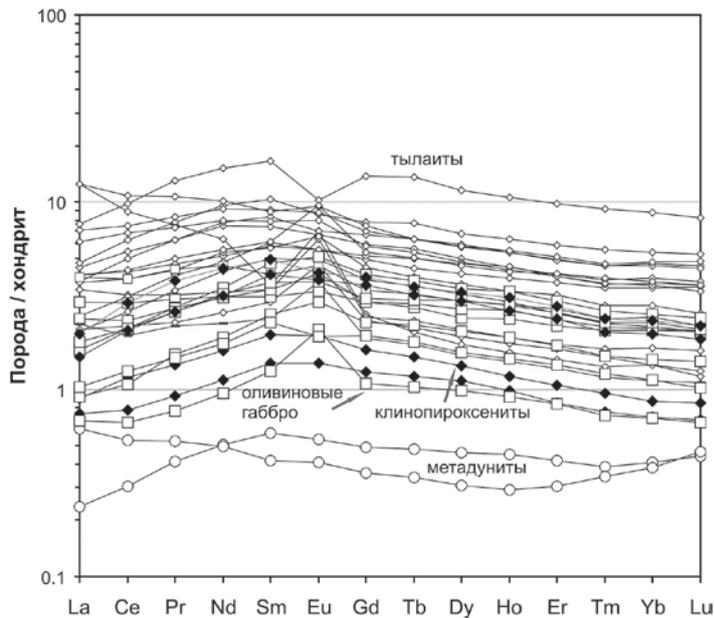


Рис. 3. Спектры элементов группы редких земель в породах разреза массива Денежкин Камень

графией блока, причем абсолютное большинство микроэлементов обнаруживает явную тенденцию к накоплению в основании разреза (рис. 2). Гранулометрические измерения показали, что геохимические градиенты связаны с микроструктурным градиентом, отражающим возрастание контрастности (крупные порфиорокласты — мелкозернистая матрица) и напряженности микроструктуры пород к основанию разреза [7]. Таким образом, химические и структурные изменения связаны общей причиной, выразившейся в нарастающей деформации к основанию разреза.

Выводы

Денежкинский блок горячего меланжа обладает хорошо выраженным концентрическим центриклинальным структурным рисунком, похожим на рисунок расслоенных интрузий. Однако эта особенность химической структуры слагающей его стратифицированной серии не является первичной, связанной с камерной кристаллизацией магмы, а демонстрирует нечто противоположное тому, что имеет место в разрезах расслоенных интрузий. Наиболее непротиворечиво она объясняется исходя из предположения о динамометаморфической природе слагающего разрез горячего меланжа, представляющего собой тектоническую смесь двух исходных элементов — дунит-пироксенитового и оливин-габбрового, уравновешенную в условиях гранулитовой фации низкого давления и при общем уровне подвижности кислорода. Хаотичность

пространственного распределения пород есть результат тектонического смещения исходных элементов горячего меланжа, а непрерывность химического тренда обусловлена химическим обменом между ними.

Поскольку исходные компоненты горячей смеси не имели необходимого внутреннего ресурса микроэлементов, а также щелочей и кремнезема, следует предполагать, что в эпоху образования горячего меланжа имел место привнос вещества из внешнего источника. Геохимические градиенты связаны со стратиграфией блока, причем абсолютное большинство микроэлементов обнаруживают явную тенденцию к накоплению в нижней 3-километровой зоне разреза, сложенной породами с резко выраженной порфиорокластической структурой.

Общей причиной сопряженных микроструктурных и химических изменений пород и минералов в разрезе блока, вероятнее всего, является тектоно-метаморфическая трансформация большой массы горячей тектонической смеси, имевшая место до перемещения массива в толщу верхней коры.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 23 (проект 12-П-5-2015).

Литература

1. Воробьева О. А. Габбро-пироксенит-дунитовый пояс Среднего Урала и проблема его происхождения // Магматизм, метаморфизм, металлогения Урала: Тр. Первого Уральского петрогр. совещ. Свердловск, 1963. Т. 1. С. 373—374. 2. Воробьева О. А., Самойлова Н. В.,

Свешникова Е. В. Габбро-пироксенит-дунитовый пояс Среднего Урала. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 319 с. (Тр. ИГЕМ АН СССР, вып. 65). 3. Ефимов А. А. Габбро-гипербазитовые комплексы Урала и проблема офиолитов. М.: Наука, 1984. 232 с. 4. Ефимов А. А., Ефимова Л. П. Кытлымский платиновый массив. М.: Недра, 1967. 336 с. 5. Ефимов А. А., Ефимова Л. П., Маегов В. И. Стронций в плагиоклазе уральских габбро: петрогенетический и прикладной аспекты // Геохимия. 1989. № 11. С. 1541—1553. 6. Ефимов А. А., Маегов В. И. О природе «скрытой расслоенности» в разрезе полосатой габбро-гипербазитовой серии Денежкина Камня (Северный Урал) // Докл. АН СССР, 1981. Т. 256. № 3. С. 658—662. 7. Ефимов А. А., Новенко П. В. Связь микроструктурной и химической эволюции в породах горячего меланжа Денежкина Камня (Платиноносный пояс Урала) // Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 131—135. 8. Иванов О. К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Изд. Уральск. госуниверситета, 1997. 488 с. 9. Маегов В. И. Вариации состава магнетита в габбро по разрезу полосатой габбро-гипербазитовой серии Денежкина Камня (Северный Урал) // Материалы к минералогии Урала: Информ. материалы. Свердловск: АН СССР, УО ВМО, 1990. С. 36—41. 10. Маегов В. И. Вариации состава оливина в разрезе полосатой габбро-гипербазитовой серии Денежкина Камня и их петрогенетическое значение // Актуальные проблемы магматич. геологии, петрологии и рудообразования: Материалы, посвященные памяти проф. Д. С. Штейнберга. Екатеринбург, 1995. С. 10—21. 11. Молдавцев Е. П. Геологические исследования Денежкина Камня в Северном Урале в 1925 г. // Изв. Геол. ком., 1927. Т. 46, № 2. С. 157—173. 12. Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П., Голик С. В., Журавлев Д. З., Попова О. Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element 2: Информационный сборник научных трудов ИГГ УрО РАН // Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 423—433. 13. Яковлева О. М. О термодинамических условиях образования роговиков экзоконтакта пироксенитов массива Денежкин Камень Платиноносного пояса // Ежегодник-1986. Екатеринбург: ИГГ УНЦ АН СССР, 1987. С. 55—57.

Рецензент
д. г.-м. н. А. М. Пыстин