

## ГЕОХИМИЯ ГРАНАТОВ ИЗ ВЫСОКОБАРИЧЕСКИХ ПОРОД МАССИВА МИНДЯК

© 2015 г. Д. В. Кузнецов, Е. В. Пушкарёв

Гранатовые ультрамафиты и мафиты зоны Главного уральского разлома (ГУР) были подробно описаны Е.А. Денисовой [2], Е.В. Пушкарёвым [3–6], А.А. Савельевым [8] и Дж. Скэрроу [17, 18], также было выполнено несколько исследований, посвященных геохимии граната из этих пород [1, 7]. По составу все они разделены на три типа: 1) пироповые и оливин-шпинель-пироповые вебстериты, 2) гранатовые клинопироксениты и гранатиты, 3) амфибол-пироксен-ильменит-гранатовые базиты. Показано, что состав граната отражает типизацию высокобарических пород [6]. В вебстеритах гранат представлен умереннокальциевым пиропом. В гранатовых клинопироксенитах и гранатитах гранат отвечает по составу высококальциево-

му альмандин-пиропу. В амфибол-пироксен-ильменитовых базитах гранат соответствует высококальциевому пироп-альмандину. Дж. Скэрроу с соавторами [17, 18] было высказано предположение о низкобарическом габбровом характере субстрата для гранатовых пироксенитов, основанное на наличии у них положительной европиевой аномалии. Нами высказано предположение [5], что состав граната, его геохимические особенности, могут отражать природу субстрата гранатовых пироксенитов. Для этого было проведено изучение геохимии мономинеральных фракций гранатов из разных типов высокобарических пород Миндякского массива методом ICP-MS на приборе Ellan-9000 в ЦКП УрО РАН “Геоаналитик” (г. Екатеринбург) (табл. 1).

**Таблица 1.** Содержание основных компонентов (мас. %), микроэлементов (г/т) и нормативный состав (мол. %) в представительных пробах гранатов из пород массива Миндяк

Компонент/ элемент	МК-69	МК-204	МК-214	МК-68	МК-143	ПЕ-1510	ПЕ-1512
	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	38.17	38.57	40.72	40.87	40.85	41.90	41.42
TiO <sub>2</sub>	0.13	0.16	0.05	0.05	0.05	0.07	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.94	20.68	22.15	22.18	21.16	22.45	23.47
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.05	0.09	0.05	0.21	0.62	0.25
FeO*	21.85	18.66	13.65	12.32	12.10	11.37	10.66
MnO	1.15	0.82	0.54	0.33	0.40	0.47	0.45
MgO	5.04	5.67	11.43	12.88	13.22	17.32	18.13
CaO	13.24	14.19	10.71	10.94	11.29	5.64	5.26
Сумма	99.61	98.80	99.34	99.62	99.27	99.84	99.80
Пироп	19.60	21.88	42.16	47.25	48.15	61.99	64.88
Альмандин	40.75	37.07	28.17	23.15	21.01	21.44	20.30
Гроссуляр	26.11	33.96	27.94	25.32	23.37	10.54	11.02
Спессаргин	2.54	1.80	1.12	0.69	0.83	0.95	0.91
Андрадит	10.56	4.87	0.34	3.39	6.15	3.78	2.21
Шорломит	0.26	0.32	0.09	0.10	0.09	0.12	0.20
Уваровит	0.19	0.11	0.18	0.10	0.39	1.18	0.47
Li	2.61	1.28	1.35	7.37	2.22	4.71	3.34
Co	29.14	45.43	39.79	53.13	50.40	47.85	51.82
Ni	15.43	14.21	22.27	37.68	20.82	44.28	86.82
Sc	87.01	94.26	15.76	67.49	89.63	89.51	83.88
Cr	161.20	273.27	100.88	538.92	868.04	3163.32	2694.47
Zr	28.66	56.59	56.83	4.76	6.00	16.22	23.57
Hf	0.71	1.09	1.01	0.14	0.06	0.29	0.12
Nb	1.16	0.15	0.17	0.02	0.00	0.00	9.44
Th	0.20	0.09	0.33	0.01	0.02	0.00	0.00
U	0.18	0.19	1.69	0.03	0.03	0.03	0.01
Rb	3.05	0.75	1.36	1.08	1.06	1.28	0.34
Sr	16.98	9.77	26.04	12.39	5.72	4.40	4.10

Таблица 1. Окончание

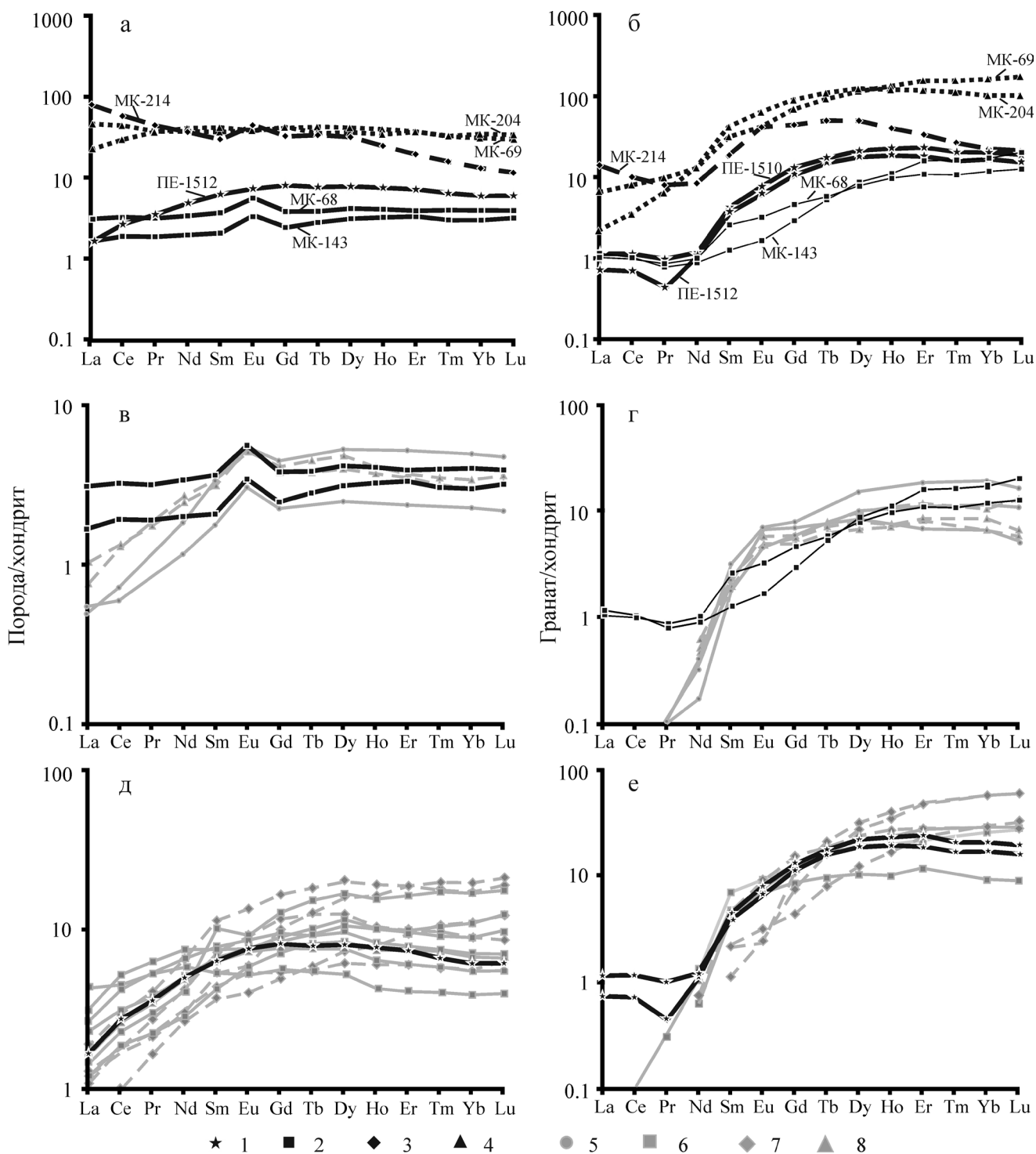
Компонент/ элемент	МК-69	МК-204	МК-214	МК-68	МК-143	ПЕ-1510	ПЕ-1512
	1	2	3	4	5	6	7
Cs	0.04	0.04	0.01	0.08	0.01	0.06	0.18
Ba	53.43	31.75	34.66	45.40	22.29	26.99	13.87
La	1.48	0.49	3.38	0.24	0.27	0.27	0.17
Ce	4.61	2.02	6.23	0.60	0.63	0.71	0.44
Pr	0.87	0.57	0.77	0.08	0.07	0.10	0.04
Nd	5.67	5.70	3.98	0.46	0.41	0.56	0.54
Sm	4.48	5.91	2.91	0.39	0.19	0.59	0.66
Eu	2.28	3.40	2.44	0.19	0.10	0.38	0.46
Gd	13.14	17.02	9.25	0.94	0.60	2.29	2.70
Tb	3.20	3.77	1.90	0.21	0.20	0.59	0.65
Dy	27.01	28.73	12.87	2.00	2.21	4.68	5.51
Ho	6.95	6.25	2.32	0.55	0.63	1.08	1.29
Er	23.73	17.98	5.65	1.80	2.63	3.08	3.94
Tm	3.66	2.63	0.69	0.27	0.42	0.42	0.52
Yb	25.60	15.99	3.88	2.00	2.91	2.84	3.47
Lu	4.09	2.39	0.55	0.32	0.51	0.40	0.49
Y	153.28	150.26	60.41	11.52	15.68	25.06	30.67
Ti	3829.31	1651.21	967.20	398.74	337.95	448.93	671.39
V	234.36	239.38	137.00	51.71	68.02	102.24	129.22
Mn	3698.78	3950.65	2327.65	1977.74	1654.50	1620.54	2871.39
Cu	49.76	43.13	2.245	18.94	31.78	10.45	12.19
Zn	45.91	52.69	49.85	86.51	23.82	24.42	27.76
Ga	9.46	11.04	9.54	4.24	4.32	5.79	6.68
Ge	3.64	4.50	3.23	1.93	2.49	2.32	2.02
Ag	19.99	168.83	74.97	6.67	25.56	7.34	25.79
Cd	0.00	0.92	0.36	0.00	0.09	0.01	0.19
Sn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sb	0.36	0.46	0.57	0.62	0.12	0.13	0.22
Te	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
Tl	0.63	0.29	0.38	2.01	0.42	0.50	0.14
Pb	0.27	8.36	1.45	1.05	0.50	0.15	2.75
Bi	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
W	0.27	0.11	0.61	0.00	0.00	0.17	0.56

Примечание. 1–2 – амфибол-пироксен-ильменитовые базиты, 3 – гранатиты, 4–5 – гранатовые пироксениты, 6–7 – пироповые вебстериты. FeO\* – все железо в виде FeO. Для гранатов из пироповых вебстеритов ПЕ-1510 содержание основных компонентов и нормативный состав даны как среднее (n = 48). **Анализы основных компонентов выполнены на рентгеновском микроанализаторе Cameca SX-100 в ЦКП УрО РАН “Геоаналитик” (г. Екатеринбург).** Микроэлементы определялись методом ICP-MS на приборе Ellan-9000 в ЦКП УрО РАН “Геоаналитик” (г. Екатеринбург).

Суммарное содержание P3Э в пиропе составляет 18–21 г/т. La/Yb-отношение, равное 0.05–0.09, отражает общее для гранатов фракционирование P3Э – повышенные содержания тяжелых P3Э относительно легких. Нормированные по хондриту содержания P3Э (рис. 1б) имеют минимум в области Pr, затем **положительный наклон к Eu и положительную выпуклую форму** в области TP3Э со сглаженным максимумом на участке Dy–Er, Gd/Yb = 0.8. Пироп обладает более высокими содержаниями Sr (рис. 2а) и Ni **относительно гранатов из других пород** массива Миндяк, что соответствует более магниальному составу пород. По сравнению с гранатами из двух других типов высокобарических пород ГУР пироп обладает наименьшими содержаниями таких крупноионных литофильных элементов, как Ba, Sr (см. рис. 2в), Rb, и **более высокими со-**

держаниями Cs. Уровень транзитных элементов Ti (см. рис. 2г), V, Mn в пиропе близок к таковому в гранатах из клинопироксенитов и ниже относительно гранатов амфибол-пироксен-ильменитовых базитов.

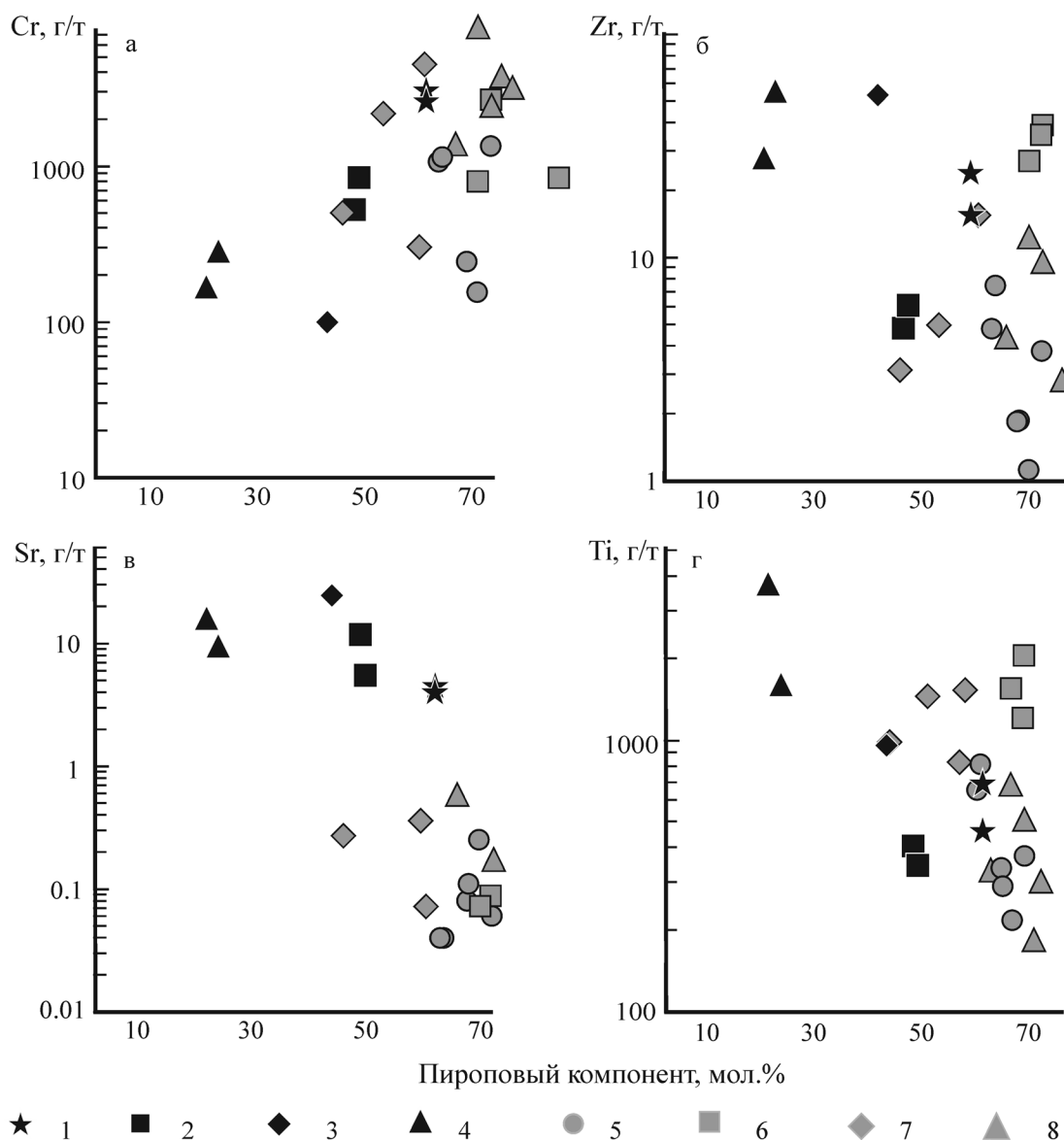
Гранатовые клинопироксениты и гранатиты массива Миндяк содержат гранаты близкого состава, однако сами породы значительно различаются по валовой геохимии. В частности, гранатиты, в отличие от пироксенитов, характеризуются негативным распределением нормированных по хондриту содержаний P3Э и обогащенностью цирконием, ниобием и другими редкими элементами, что связано с повышенными концентрациями в породах апатита, рутила, ильменита, циркона и других минералов [6]. Геохимия гранатов тоже отражает различия в составе пород (см. рис. 1а, б).



**Рис. 1.** Содержание редкоземельных элементов, нормированное по стандартному углестому хондриту C1 [19].

а – породы массива Миндяк (названия см. в табл. 1); б – гранаты из пород массива Миндяк; в – гранатовые метагаббро орогенных лерцолитовых массивов Ронда, Бени Бушера [11, 14] (серые линии) и гранатовые пироксениты массива Миндя (черные линии); г – гранат из гранатовых метагаббро орогенных лерцолитовых массивов Ронда, Бени Бушера [11, 15] и из гранатовых пироксенитов массива Миндяк; д – гранатовые клинопироксениты и вебстериты массива Бени Бушера и пироповые вебстериты массива Миндяк; е – гранат из гранатовых клинопироксенитов и вебстеритах массива Бени Бушера и из пироповых вебстеритов массива Миндяк.

1–4 – массив Миндяк: 1 – пироповые вебстериты, 2 – гранатовые пироксениты, 3 – гранатиты, 4 – амфибол-пироксен-гранат-ильменитовые породы; 5–8 – орогенные лерцолитовые массивы [11, 14, 15]: 5 – глиноземистые мафические породы массива Ронда, 6 – гранатовые вебстериты, 7 – гранатовые клинопироксениты, 8 – гранатовые метагаббро массива Бени Бушера.



**Рис. 2.** Диаграммы содержания редких элементов относительно пиропового компонента для гранатов из пород массива Миндяк и орогенных лерцолитовых массивов.

Данные для гранатов из Бени Бушера по А.Р. Gysi [11], для гранатов из массива Ронда – по Т. Morishita [15]. Условные обозначения – см. рис. 1.

Гранат из клинопироксенитов обладает наименьшим суммарным содержанием РЗЭ, равным 10–11 г/т, и характеризуется более слабой степенью их фракционирования,  $La/Yb = 0.09–0.12$ . Спектр распределения имеет сглаженный минимум в области Pr, а затем относительно пологий положительный наклон к Lu,  $Gd/Yb = 0.2–0.5$ . Содержания высокозарядных элементов, таких как Zr (см. рис. 2б) и Hf, ниже чем в пиробах, несмотря на то что породы имеют основной состав. Содержания совместимых элементов Sr и Ni, а также крупноионных элементов Rb, Ba, Sr находятся между пиробами и пироп-гроссуляр-альмандиновыми гранатами ильменитовых метабазитов.

Высококальциевый альмандин-пироп из гранатитов содержит повышенное количество РЗЭ относительно сходного с ним по составу граната из клинопироксенитов (см. рис. 1б). Спектр распределения РЗЭ имеет выпуклую форму со сглаженным минимумом на участке Pr–Nd и сглаженным максимумом в области от Eu до Dy и отрицательным наклоном по направлению к Lu с отношением  $Gd/Yb 2.4$ . Этот гранат имеет наибольшее содержание La и аномально высокое для исследуемых гранатов отношение  $La/Yb 0.87$ . Гранат из гранатитов характеризуется более высокими содержаниями Zr, Sr и меньшими концентрациями Sr относительно гранатов из других пород. По содержанию транзит-

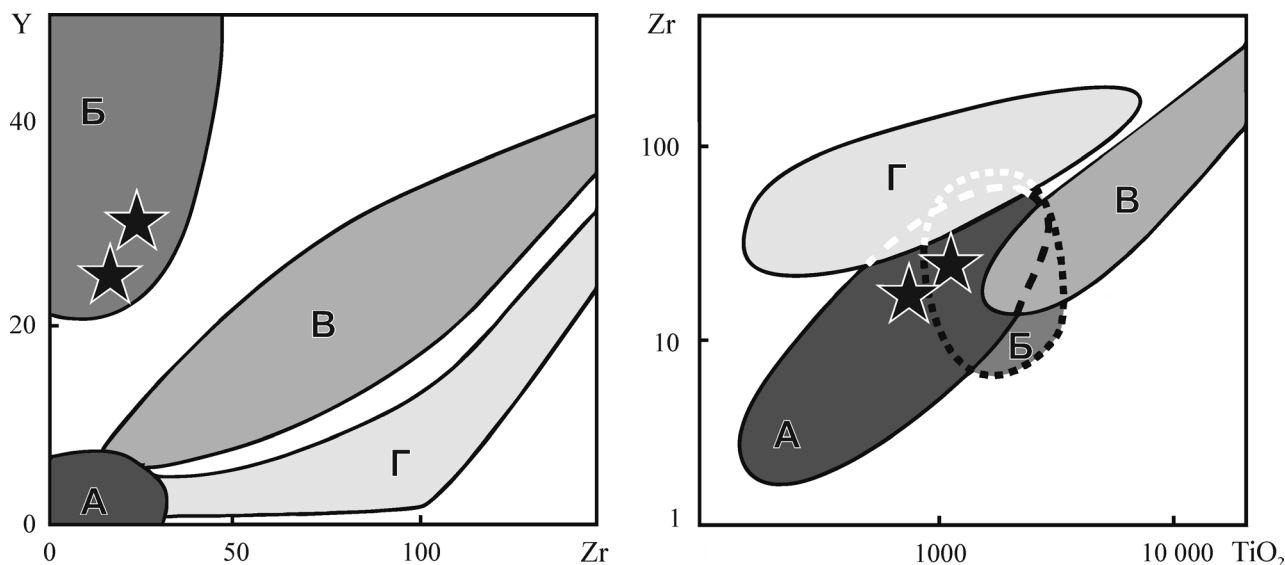


Рис. 3. Классификационные диаграммы Ti–Zr и Y–Zr для гранатов из перидотитов по W.L. Griffin [10], показывающие положение гранатов из пироповых вебстеритов (указаны звездочкой).

Поля: А – истощенных перидотитов, Б – фертильных (обогащенных) перидотитов, В – метасоматических перидотитов, Г – метасоматических перидотитов с флогопитом.

ных элементов Ti, V, Mn он занимает среднее положение. Данные гранаты обладают более высокими содержаниями U и Th.

Гранаты из амфибол-пироксен-ильменитовых базитов обладают наибольшим суммарным содержанием РЗЭ в интервале 113–128 г/т. Они характеризуются интенсивным фракционированием РЗЭ среди исследуемых гранатов с отношением La/Yb 0.03–0.06. Спектры тяжелых РЗЭ имеют практически субгоризонтальную форму или с небольшим положительным наклоном, Gd/Yb = 0.5–1.1. Эти гранаты обладают низкими содержаниями Sr и Ni и высокими содержаниями высокозарядных элементов Zr и Hf, что близко к гранатам из гранатитов (табл. 1). Содержания крупноионных литофильных элементов Rb, Ba, Sr в этих гранатах также высокие среди гранатов из изучаемых типов пород. Это также относится и к транзитным элементам Ti, V, Mn.

По характеру распределения и содержанию редкоземельных, а также других микроэлементов в гранатах была подтверждена в общем виде выполненная ранее типизация пород. Однако гранаты из гранатитов и гранатовых пироксенитов, имея сходный состав, значительно различаются по содержаниям редких и редкоземельных элементов, отражая геохимические различия и самих пород. Таким образом, можно выделить четыре типа состава гранатов, которые соответствуют гранатам из 1) пироповых вебстеритов, 2) гранатовых клинопироксенитов, 3) гранатитов и 4) амфибол-пироксен-ильменитовых базитов.

Присутствие высокобарических гранатовых пород является одной из характерных особенностей

орогенных лерцолитовых комплексов (лерцолитовые массивы “корневых зон”) и важным критерием их отличия от океанических офиолитовых комплексов, где гранатовые ассоциации отсутствуют. Однако это справедливо тогда, когда гранатовые высокобарические породы непосредственно участвуют в строении лерцолитовых комплексов, что на уральских примерах пока не доказано. Отмечается только пространственная ассоциация гранатовых метабазитов и ультрамафитов с лерцолитами, но не единство их геологического положения [5]. Ранее уже отмечалось [6], что наряду с заметными геохимическими и минералогическими различиями между породами зоны ГУР и ультрамафитами и мафитами орогенных лерцолитовых массивов Ронда (Испания) и Бени Бушера (Марокко) в них присутствуют породы, имеющие сходные черты. Например, в массиве Ронда гранатовые породы образуют тонкие слои, чередующиеся с перидотитами в северной части массива [13–15 и др.]. Лерцолиты Бени Бушера содержат слои и линзы гранатовых пород, представленные гранатовыми вебстеритами, клинопироксенитами и метагаббро [9, 11, 12, 16 и др.].

Относительно гранатов из Ронда и Бени Бушера гранаты из уральских пород имеют более высокие содержания легких РЗЭ и крупноионных элементов, в частности стронция (см. рис. 2в). Гранаты из амфибол-пироксен-ильменит-гранатовых базитов и гранатитов имеют значительно более высокие содержания высокозарядных и редкоземельных элементов по сравнению с гранатами из пород орогенных лерцолитовых массивов. Пиропы из вебстеритов по содержаниям хрома, высокозарядных



и редкоземельных элементов (см. рис. 1г) близки с гранатами из вебстеритов и клинопироксенитов массива Бени Бушера, отличаясь от них меньшими содержаниями Ti (см. рис. 2г) и Mn. **Высококальциевые** алмадин-пиропы из клинопироксенитов массива Миндяк по содержаниям редкоземельных (см. рис. 1е), высокозарядных (см. рис. 2б) и транзитных элементов (см. рис. 2г) имеют наибольшую близость к гранатам из метагаббро массивов Ронда и Бени Бушера, отличаясь от них меньшими содержаниями средних РЗЭ от Eu до Tb. По содержаниям хрома они сопоставимы с метагаббро массива Ронда и пироксенитами массива Бени Бушера.

Для гранатовых метагаббро массивов Ронда и Бени Бушера рядом исследователей предполагается образование по плагиоклазовому низкобарическому протолисту, который затем был субдуцирован и преобразован в условиях высокого давления [12, 13, 16 и др.]. Это заключение, в частности, основывается на слабом фракционировании ТРЗЭ в породе и наличии положительной европиевой аномалии как в самих породах, так и в содержащихся в них гранате и клинопироксене [15]. Подобное предположение было сделано Дж. Скэрроу для некоторых гранатовых пород массива Миндяк [17, 18] на основании положительной европиевой аномалии и изотопии Sr, Nd и Pb. **Однако в гранатах из клинопироксенитов массива Миндяк европиевая аномалия отсутствует, но присутствуют высокие содержания Sr и Ba, которые также могут свидетельствовать в пользу их плагиоклазового габбрового протолита.**

Пироповые вебстериты, имея с гранатовыми клинопироксенитами и вебстеритами массива Бени Бушера близкие содержания РЗЭ в породе и гранате, значительно отличаются от них по валовой геохимии. На классификационных диаграммах Ti–Zr и Y–Zr (рис. 3) для гранатов из перидотитов по В.Л. Гриффину [10] фигуративные точки пироповых вебстеритов соответствуют обогащенным перидотитам.

Полученные нами данные по геохимии гранатов из высокобарических пород массива Миндяк подтверждают выделение трех типов пород, выполненное ранее [5], и позволяют выделить четвертый тип, к которому относятся гранатиты, обогащенные РЗЭ и редкими элементами. Можно предположить, что гранатиты являются высокобарическими метасоматическими породами, в образовании которых принимали участие высокостронциевые и высокобариевые флюиды, которые могли быть отделены от субдуцируемой океанической плиты. Такие же особенности характерны для гранатовых пироксенитов Миндяка. Это позволяет согласиться с заключением Дж. Скэрроу [17, 18] о низкобарической габбровой природе этих пород, подвергшихся высокобарическому метаморфизму. Геохимия пиропов из вебстеритов,

скорее, указывает на их мантийное происхождение, возможно связанное с плавлением обогащенных перидотитов.

*Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант № 13-05-00597, полевой грант РФФИ 15-05-10018-К).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликова Г.И., Мороз Т.Н.* К геохимии гранатов из гранат-пироксенитовых пород массива Миндяк (Южный Урал) // *Материалы Десятой Межрегиональной науч.-практ. конф.* Уфа, 2014.
2. *Денисова Е.А.* Внутренняя структура Миндякского ультраосновного массива (Южный Урал) // *Докл. АН СССР.* 1984. № 2. С. 382–387.
3. *Пушкарев Е.В.* Эксплозивные брекчии с включениями высокобарических пород основного и ультраосновного состава в Миндякском лерцолитовом массиве (Башкортостан): состав и петрогенетические следствия // *Геология и перспективы расширения сырьевой базы Башкортостана и сопредельных территорий: мат-лы 4-й Республ. конф.* Уфа: ИГ УНЦ РАН, 2001. Т. 1. С. 155–168.
4. *Пушкарев Е.В., Гуляева Г.Я.* Высокобарические гранатовые гипербазиты Миндякского массива на Южном Урале // *Ежегодник-1994.* Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1995. С. 82–86.
5. *Пушкарев Е.В., Рязанцев А.В., Третьяков А.А., Белова А.А.* Высокобарические гранатовые ультраосновные и основные породы в зоне Главного Уральского глубинного разлома на Южном Урале: геологическое положение, петрология, возраст и геодинамическая интерпретация // *Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: Тр. III Междунар. конф.* Екатеринбург, 2009. Т. 2. С. 119–124.
6. *Пушкарев Е.В., Рязанцев А.В., Третьяков А.А. и др.* Гранатовые ультрамафиты и мафиты в зоне Главного Уральского разлома на Южном Урале: петрология, возраст и проблема образования // *Литосфера.* 2010. № 5. С. 101–133.
7. *Рахимов И.Р., Беликова Г.И., Мороз Т.Н., Салихов Д.Н.* Новые данные о распределении микроэлементов в гранатах Максютковского метаморфического и Миндякского габброидного комплексов, Южный Урал // *Металлогения древних и современных океанов-2011. Рудоносность осадочно-вулканогенных и гипербазитовых комплексов: мат-лы XVII науч. молодежн. школы.* Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. С. 258–262.
8. *Савельев А.А., Бибикова Е.В., Савельева Г.Н. и др.* Гранатовые пироксениты массива Миндяк на Южном Урале: обстановка и возраст формирования // *Бюл. МОИП. Отд. геол.* 2001. Т. 76 (Вып. 1). С. 22–29.
9. *El Atrassi F., Brunet F., Chazot G., Bouybaouene M., Chopin C.* Metamorphic and magmatic overprint of garnet pyroxenites from the Beni Bousera massif (northern Morocco): petrography, mineral chemistry and thermobarometry // *Lithos.* 2013. V. 179. P. 231–248.
10. *Griffin W.L., Fisher N.I., Friedman J.H., O'Reilly S.Y., Ryan C.G.* Cr-pyrope garnets in the lithospheric man-

- tle. II. Compositional populations and their distribution in time and space // *Geochem Geophys Geosyst.* 2002. V. 3, No. 12. P. 1–35.
11. *Gysi A.P., Jagoutz O., Schmidt M., Targuisti K.* Petrogenesis of Pyroxenites and Melt Infiltrations in the Ultramafic Complex of Beni Bousera, Northern Morocco // *J. Petrol.* 2011. V. 52, No. 9. P. 1679–1735.
  12. *Kornprobst J., Piboule M., Roden M., Tabit A.* Corundum-bearing garnet clinopyroxenite at Beni Bousera (Morocco): Original plagioclase-rich gabbros recrystallized at depth within the mantle // *J. Petrol.* 1990. V. 31, No. 3. P. 717–745.
  13. *Morishita T., Arai S., Gervilla F.* High-pressure aluminous mafic rocks from the Ronda peridotite massif, southern Spain: significance of sapphirine- and corundum-bearing mineral assemblages // *Lithos.* 2001. V. 57. P. 143–161.
  14. *Morishita T., Arai S., Gervilla F.* (2003) Closed-system recycling of crustal materials in the alpinetype peridotite // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. V. 67, No. 2. P. 303–310.
  15. *Morishita T., Arai S., Ishida Y., Tamura A., Gervilla F.* Constraints on the evolutionary history of aluminous mafic rocks in the Ronda peridotite massif (Spain) from trace-element compositions of clinopyroxene and garnet // *Geochem. J.* 2009. V. 43. P. 191–206.
  16. *Pearson D.G., Davies G.R., Nixon P.H.* Geochemical constraints on the petrogenesis of diamond facies pyroxenite from the Beni Bousera peridotite massif, North Morocco // *J. Petrol.* 1993. V. 34, No. 1. P. 125–172.
  17. *Scarrow J.H., Savelieva G.N., Glodny J. et al.* The Mindyak Paleozoic lherzolite ophiolite, Southern Urals: geochemistry and geochronology // *Ophioliti.* 1999. V. 24, No. 2. P. 241–248.
  18. *Scarrow J.H., Spadea P., Cortesogno L. et al.* Geochemistry of garnet metagabbros from the Mindyak ophiolite massif, Southern Urals // *Ophioliti.* 2000. V. 25, No. 2. P. 103–115.
  19. *Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins.* Geol. Soc. Spec. Publ. 1989. No. 42. P. 313–345.