

БАЛАНС ХРОМА В ХОДЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДУНИТ-ГАРЦБУРГИТ-ЛЕРЦОЛИТОВЫХ СЕРИЙ УРАЛА

© 2009 г. И. С. Чашухин

Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7
E-mail: chashchukhin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 25.02.2009 г.

Изучено распределение хрома между хромшпинелью, орто- и клинопироксенами и рассчитаны минеральные балансы Cr_2O_3 в 78 образцах ультрамафитов массивов Крака и Нурали. Показано, что на распределение Cr между фазами и на их вклад в баланс породы влияют два последовательных процесса – частичное плавление вещества верхней мантии и трансформация шпинелевых фаций в плагиоклазовые. По мере удаления легкоплавких компонентов из пиролита коэффициенты распределения Cr между пироксенами, с одной стороны, и хромшпинелью – с другой, закономерно уменьшаются от 0.05 до 0.01 для ортопироксенов и от 0.08 до 0.02 для клинопироксенов. В этом направлении вклад клинопироксена в баланс Cr_2O_3 снижается с 30% до нуля, а хромшпинели – увеличивается с 10 до 80%. Вклад ортопироксена варьирует от 10 до 70% при отсутствии какой-либо корреляции со степенью частичного плавления. Преобразование шпинелевой фации в плагиоклазовую уменьшает величину $K_D^{\text{Орп, Срп/Sp}}$ в пределе на полпорядка, но слабо влияет на величины минеральных вкладов в баланс хрома в породе.

Ключевые слова: хром, баланс, клинопироксен, ортопироксен, хромшпинель, Крака, Нурали.

ВВЕДЕНИЕ

Не вызывает сомнения, что источником хрома при образовании месторождений хромовых руд в дунит-гарцбургит-лерцолитовых комплексах служит вещество верхней мантии. Необходимым условием для этого является переход изначально силикатной формы хрома в оксидную. Переотложение хрома из пироксенов в хромшпинель может осуществляться на разных этапах эволюции верхнемантийного вещества. В предлагаемой публикации на примере дунит-гарцбургит-лерцолитовых комплексов Урала количественно охарактеризована трансформация силикатного хрома в оксидный на самом раннем этапе этой эволюции – в ходе частичного плавления примитивной мантии. С этой целью изучено распределение хрома между сосуществующими хромшпинелью, орто- и клинопироксенами и рассчитаны минеральные балансы Cr_2O_3 в зависимости от степени частичного плавления.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Всего изучено 78 образцов из массивов Северный, Средний, Южный и Узьянский Крака и из Нуралинского массива. Они представлены шпинелевыми и плагиоклазовыми лерцолитами, гарцбургитами и дунитами. Петрографически лерцолиты отличаются от гарцбургитов присутствием раннего клинопироксена; клинопироксен в гарцбургитах является продуктом распада первичного орто-

пироксена и, как правило, развивается вокруг его зерен.

Породы претерпели раннюю изохимическую пегматизацию серпентинизацию в диапазоне 10–90, чаще 20–60 мас. %. Для всех образцов пород в Полевской лаборатории бывшего ПГО “Уралгеология”, аттестованной по III категории точности, выполнены полные силикатные анализы, в том числе на Cr_2O_3 . Для получения сопоставимых данных анализы рассчитаны на сухой остаток. Составы хромшпинели, орто- и клинопироксенов определены рентгеноспектральным методом на микроанализаторе JXA-5 в лаборатории Института геологии и геохимии УрО РАН (оператор В.Г. Гмыра). Результаты анализов на хром приведены в табл. 1.

Степень частичного плавления охарактеризована массовой долей глинозема в породе, которая постепенно снижается с 3.7 в лерцолитах до 0.2% в дунитах. Использование для этой цели состава аксессуарной хромшпинели корректно только для шпинелевой фации; при преобразовании шпинелевых ультрамафитов в плагиоклазовые происходит перераспределение глинозема из хромшпинели в плагиоклаз, что ведет в пределе к трехкратному росту хромистости хромшпинели (рис. 1).

Ультрамафиты изученных массивов сложены единой серией с постепенным уменьшением массовых долей кремнезема, глинозема, извести и титана и увеличением магнезии и оксида никеля при постоянной концентрации железа, марганца и хрома [6]. Средние величины массовых долей Cr_2O_3 , независимо от состава пород, практически равны и

Таблица 1. Баланс Cr_2O_3 в дунит-гарцбургит-лерцолитовых сериях Урала

№ п/п	№ обр.	Порода	Состав породы, мас. %				Cr ₂ O ₃ , мас. %		Cr ₂ O ₃ в минералах, мас. % (его доля в %)		
			Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Орх	Срх	Орх	Срх	Орх	Срх	Sp
Северный Крака											
1	7440	Гц	0.86	0.46	35	2	0.62	1.49	0.22(47)	0.03(5)	0.22(48)
2	7444	ПЛ	3.26	0.38	34	10	0.59	1.02	0.20(53)	0.10(27)	0.08(20)
3	7468	Гц	1.14	0.52	37	3	0.83	н.д.	0.30(58)	н.д.	0.22(42)
4	7471	ШЛ	2.18	0.48	33	9	0.54	0.99	0.18(37)	0.09(18)	0.21(45)
5	7475	ШЛ	2.24	0.43	32	9	0.51	1.01	0.16(38)	0.10(22)	0.17(40)
6	7477	ШЛ	1.84	0.40	30	8	0.54	1.07	0.16(40)	0.09(23)	0.15(37)
7	7503	ШЛ	2.08	0.43	30	8	0.46	0.83	0.14(33)	0.07(16)	0.22(51)
8	7504	ПЛ	2.75	0.41	30	11	0.54	0.89	0.16(40)	0.09(23)	0.15(37)
9	7511	ШЛ	2.22	0.43	23	10	0.52	0.78	0.12(27)	0.08(17)	0.24(56)
10	7512	Гц	0.68	0.38	30	1	0.72	н.д.	0.21(56)	н.д.	0.17(44)
11	7518	Гц	0.68	0.50	13	2	0.65	1.49	0.09(18)	0.04(7)	0.38(75)
Средний Крака											
12	7280	Гц	0.96	0.45	38	3	0.65	1.32	0.25(56)	0.04(8)	0.16(36)
13	7288	ШЛ	1.53	0.42	35	7	0.57	1.36	0.20(49)	0.09(21)	0.13(30)
14	7294	ПЛ	3.59	0.43	35	11	0.59	0.96	0.20(48)	0.11(25)	0.12(27)
15	7297	ПЛ	2.66	0.40	39	7	0.52	1.10	0.20(50)	0.08(20)	0.12(30)
16	7300	ШЛ	1.71	0.43	32	5	0.54	н.д.	0.18(41)	н.д.	0.25(59)
17	7306	Гц	1.06	0.47	34	3	0.60	0.96	0.20(43)	0.03(6)	0.24(51)
18	7319	ПЛ	3.69	0.36	29	12	0.41	0.91	0.12(33)	0.11(31)	0.13(36)
19	7320	ПЛ	2.51	0.36	28	8	0.62	0.99	0.17(49)	0.08(22)	0.10(29)
20	7321	ПЛ	2.15	0.43	29	8	0.54	0.99	0.16(37)	0.08(18)	0.19(45)
21	7322	ПЛ	2.67	0.40	26	10	0.65	1.13	0.17(42)	0.11(28)	0.12(30)
22	7323	ШЛ	1.42	0.44	33	6	0.70	1.39	0.23(52)	0.09(20)	0.12(28)
23	7325	ШЛ	1.34	0.47	32	6	0.67	н.д.	0.22(46)	н.д.	0.25(54)
24	7333	ПЛ	1.96	0.42	30	5	0.59	0.96	0.18(42)	0.05(11)	0.20(47)
Южный Крака											
25	422	Гц	1.01	0.31	21	4	0.53	1.15	0.11(36)	0.04(13)	0.16(51)
26	424	ШЛ	1.54	0.39	26	6	0.67	1.02	0.18(45)	0.06(14)	0.16(41)
27	428	Гц	0.89	0.45	28	2	0.80	1.44	0.23(51)	0.03(6)	0.19(43)
28	434	ШЛ	1.30	0.43	24	5	0.64	1.17	0.15(35)	0.06(13)	0.23(52)
29	437	Гц	0.75	0.40	25	2	0.80	1.51	0.20(49)	0.03(8)	0.17(43)
30	441	Гц	0.74	0.38	20	3	0.81	1.47	0.16(43)	0.04(11)	0.18(46)
31	445	ШЛ	1.89	0.36	31	5	0.54	1.15	0.16(46)	0.06(18)	0.13(36)
32	448	ШЛ	2.30	0.46	29	8	0.67	1.25	0.19(42)	0.10(21)	0.17(37)
33	481	Гц	0.39	0.47	25	0	0.56	0	0.14(30)	0.00(0)	0.33(70)
34	482	ШЛ	1.85	0.33	27	9	0.57	1.04	0.15(46)	0.09(27)	0.09(27)
35	484	Гц	0.44	0.39	27	0	0.73	1.44	0.20(51)	0.01(2)	0.19(47)
36	495	ПЛ	1.66	0.39	28	5	0.67	1.04	0.18(47)	0.05(13)	0.16(40)
37	504	Гц	0.29	0.54	14	2	0.53	1.12	0.07(14)	0.03(5)	0.44(81)
38	509	ПЛ	2.77	0.35	34	11	0.52	0.92	0.18(51)	0.10(28)	0.08(21)
39	512	ПЛ	1.19	0.42	15	5	0.43	0.78	0.07(16)	0.04(10)	0.31(74)
40	513	ШЛ	1.58	0.38	28	5	0.83	1.31	0.24(62)	0.07(19)	0.07(19)
41	519	ШЛ	1.43	0.29	29	5	0.73	1.28	0.21(73)	0.07(24)	0.01(3)
42	533	Гц	0.56	0.37	26	2	0.67	0.89	0.17(47)	0.02(5)	0.17(48)
43	538	Гц	0.77	0.35	22	4	0.78	1.34	0.17(49)	0.05(15)	0.13(36)
44	539	Гц	0.52	0.36	27	3	0.74	н.д.	0.20(55)	н.д.	0.16(45)
45	547	Гц	0.41	0.36	22	2	0.74	н.д.	0.16(45)	н.д.	0.20(55)
46	551	Гц	0.58	0.32	28	2	0.59	н.д.	0.16(51)	н.д.	0.16(49)
47	568	ШЛ	2.04	0.36	31	8	0.59	1.04	0.18(50)	0.08(23)	0.09(27)
48	574	Гц	0.64	0.41	21	3	0.62	1.23	0.13(31)	0.03(8)	0.25(61)
49	607	ПЛ	2.45	0.39	31	7	0.68	1.20	0.21(55)	0.09(22)	0.09(23)
50	610	Гц	0.87	0.43	20	2	0.88	1.31	0.17(40)	0.02(5)	0.23(55)

Таблица 1. Окончание

№ п/п	№ обр.	Порода	Состав породы, мас. %				Cr ₂ O ₃ , мас. %		Cr ₂ O ₃ в минералах, мас. % (его доля в %)		
			Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Орх	Срх	Орх	Срх	Орх	Срх	Sp
Узянский Крака											
51	7358	Гц	0.73	0.38	32	2	0.69	0.98	0.22(57)	0.02(6)	0.14(37)
52	7365	Гц	0.82	0.45	39	2	0.59	н.д.	0.23(51)	н.д.	0.22(49)
53	7370	Гц	1.01	0.76	32	2	0.62	н.д.	0.20(26)	н.д.	0.56(74)
54	7387	Д	0.26	0.40	5	1	0.67	н.д.	0.03(9)	н.д.	0.37(91)
55	7391	ШЛ	1.48	0.51	39	8	0.52	0.78	0.20(40)	0.06(13)	0.24(47)
56	7392	Гц	1.62	0.53	38	4	0.38	1.02	0.15(27)	0.05(9)	0.34(64)
57	7393	Гц	0.72	0.44	39	2	0.51	1.01	0.20(45)	0.02(4)	0.23(51)
58	7395	Гц	0.99	0.43	33	3	0.56	1.07	0.19(44)	0.03(8)	0.21(48)
59	7396	ШЛ	1.46	0.46	41	8	0.46	0.59	0.19(41)	0.05(10)	0.23(49)
60	7398	Гц	0.81	0.50	37	2	0.78	1.21	0.29(57)	0.02(5)	0.19(38)
61	7399	Гц	0.75	0.42	31	2	0.49	н.д.	0.15(36)	н.д.	0.27(64)
62	8761	Гц	1.05	0.30	28	1	0.82	н.д.	0.23(77)	н.д.	0.07(23)
63	8767	ШЛ	1.39	0.35	27	6	0.71	н.д.	0.19(55)	н.д.	0.16(45)
64	8771	ШЛ	1.40	0.38	26	6	0.64	н.д.	0.16(43)	н.д.	0.21(57)
Нуралинский массив											
65	7160	ШЛ	1.21	0.38	36	3	0.71	1.29	0.26(67)	0.04(10)	0.09(23)
66	7168	ШЛ	2.72	0.48	33	11	0.51	0.99	0.17(35)	0.11(22)	0.21(43)
67	7174	ПЛ	3.52	0.46	43	9	0.67	1.09	0.29(62)	0.10(22)	0.08(16)
68	7175	ПЛ	2.47	0.42	24	7	0.64	0.93	0.15(36)	0.06(15)	0.21(49)
69	7177	ПГц	1.73	0.47	30	3	0.79	1.36	0.24(51)	0.05(10)	0.18(39)
70	7178	ПЛ	3.57	0.47	53	15	0.64	0.99	0.34(68)	0.15(32)	0.00(0)
71	7181	ШЛ	0.85	0.42	28	7	0.57	0.92	0.16(39)	0.06(15)	0.19(46)
72	7190	ПЛ	2.26	0.34	23	5	0.74	1.36	0.17(51)	0.07(19)	0.10(30)
73	7195	ПЛ	3.06	0.41	20	11	0.62	0.94	0.13(31)	0.10(26)	0.18(43)
74	7200	ШЛ	1.22	0.47	24	8	0.57	1.29	0.14(29)	0.10(22)	0.23(49)
75	7223	ШЛ	0.68	0.51	23	9	0.46	0.94	0.10(20)	0.09(17)	0.32(63)
76	7229	ПЛ	3.13	0.40	29	11	0.51	0.94	0.15(38)	0.11(27)	0.14(35)
77	7230	ПЛ	2.92	0.39	22	11	0.56	0.95	0.12(31)	0.10(26)	0.17(43)
78	7235	ПЛ	2.78	0.45	22	10	0.69	1.02	0.15(34)	0.11(24)	0.19(42)

Примечание. Орх – ортопироксен, Срх – клинопироксен, Sp – хромшпинель, ШЛ – шпинелевый лерцолит, ПЛ – плагио-клавовый лерцолит, Гц – гарцбургит, ПГц – плагиоклавовый гарцбургит, Д – дунит; н.д. – нет данных.

составляют в изученных образцах 0.42% (рис. 2). В процессе частичного плавления коэффициент вариации Cr₂O₃ в рестите увеличивается в четыре раза – от 0.03 до 0.12. В этом же направлении происходит синхронное уменьшение концентрации алюминия в сосуществующих пироксенах и хромшпинели, параллельно растёт концентрация хрома в хромшпинели. Поведение Cr₂O₃ в пироксенах значительно сложнее [2, 7, 11]. По мере уменьшения количества первичного клинопироксена в рестите до нуля (граница лерцолитов и гарцбургитов) концентрация Cr₂O₃ в обоих пироксенах увеличивается, а после растворения этого клинопироксена уменьшается. Последующая перебалансировка состава сосуществующих пироксенов и хромшпинели нарушает эту первичную закономерность.

Для расчета баланса хрома по данным силикатных анализов пород были выполнены вычис-

ления содержаний нормативных орто- и клинопироксенов.

Суммарное количество пироксенов (ΣPx) было оценено по уравнению:

$$\Sigma Px = 268.725 - 203.377 \times a + 34.616 \times a^2,$$

где $a = (Fe^{2+} + Fe^{3+} + Mg + Ca)/Si$.

Уравнение получено при сопоставлении величины этого отношения с данными расчетов анализов пород на шпинелевую норму.

Количество нормативного клинопироксена (cpx) рассчитано по уравнению:

$$cpx = 100 \times b/c,$$

где b – массовая доля CaO в породе, c – массовая доля CaO в клинопироксене.

Количество нормативного ортопироксена ($орх$) рассчитано по разности величин суммарного пироксена и клинопироксена. Реальные содержания ортопироксена несколько выше, а клинопироксе-

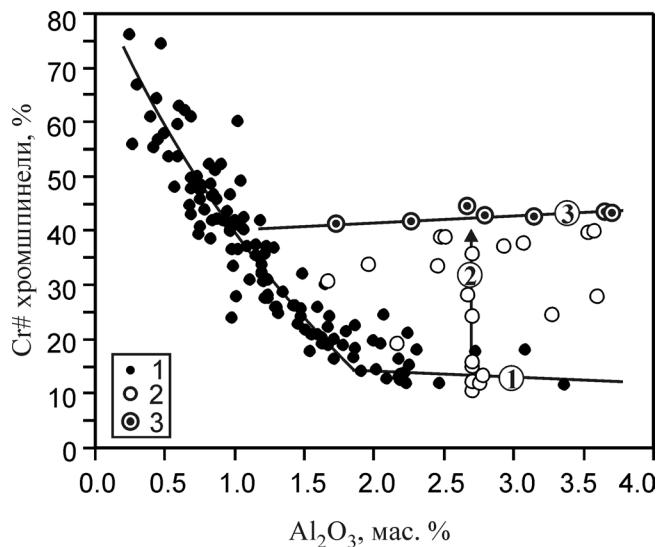


Рис. 1. Зависимость хромистости акцессорной хромшпинели от содержания Al_2O_3 во вмещающей породе.

1–3 – фации: 1 – шпинелевая, 2 – плагиоклазовая незавершенная, 3 – плагиоклазовая завершенная. Цифры в кружках – тренды: 1 – частичного плавления, 2 – трансформации шпинелевых ультрамафитов в плагиоклазовые, 3 – предельная линия равновесных составов плагиоклазовых лерцолитов. $Cr\# = 100 \times Cr/(Cr + Al)$, %

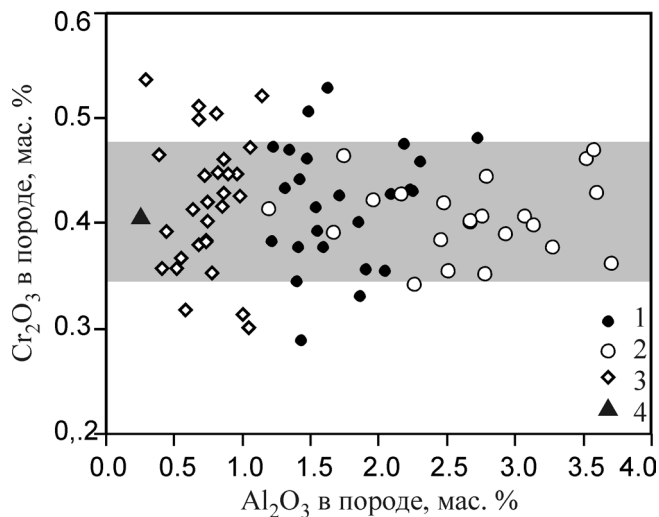


Рис. 2. Соотношение Cr_2O_3 и Al_2O_3 в дунит-гарцбургит-лерцолитовых сериях массивов Крака и Нурали.

1–2 – лерцолиты: 1 – шпинелевые, 2 – плагиоклазовые, 3 – гарцбургиты, 4 – дунит. Серое поле – область удвоенных погрешностей химического анализа на Cr_2O_3 по III категории точности [5].

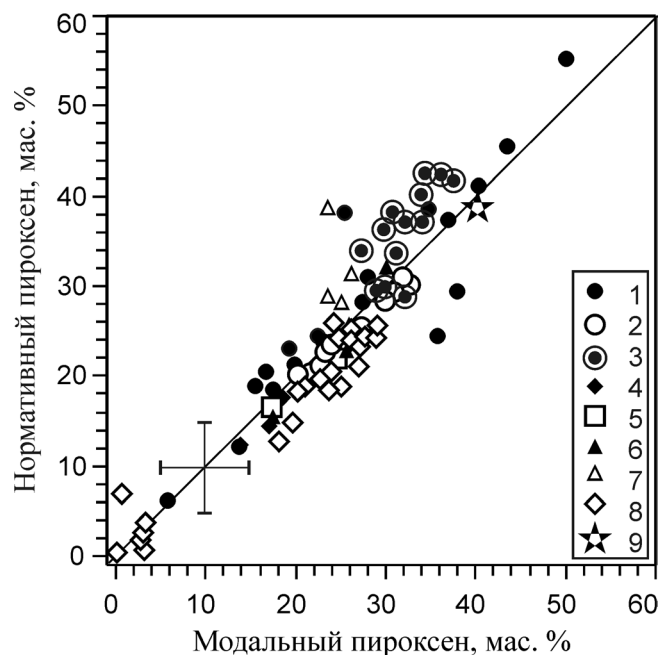


Рис. 3. Соотношение содержаний модалного и нормативного пироксена в дунит-гарцбургит-лерцолитовых комплексах.

1 – шпинелевая гарцбургит-лерцолитовая серия массива Лерц, Франция [10]; 2, 3 – фации гарцбургит-лерцолитовой серии массива Хороман, Япония [14]; 2 – шпинелевая, 3 – плагиоклазовая; 4, 5 – структуры шпинелевой фации гарцбургит-лерцолитовой серии массива Эрро-Тоббио, Италия [13]; 4 – протогранулярная, 5 – порфирокластическая; 6, 7 – фации гарцбургит-лерцолитовой серии массива Монте-Маджоре, Корсика, Франция [12]; 6 – шпинелевая, 7 – плагиоклазовая; 8 – шпинелевые ультрамафиты массива Оман [9]; 9 – деплетированная мантия [15]. Рассчитано по материалам авторов. Проведена линия равных содержаний модалного и нормативного пироксена.

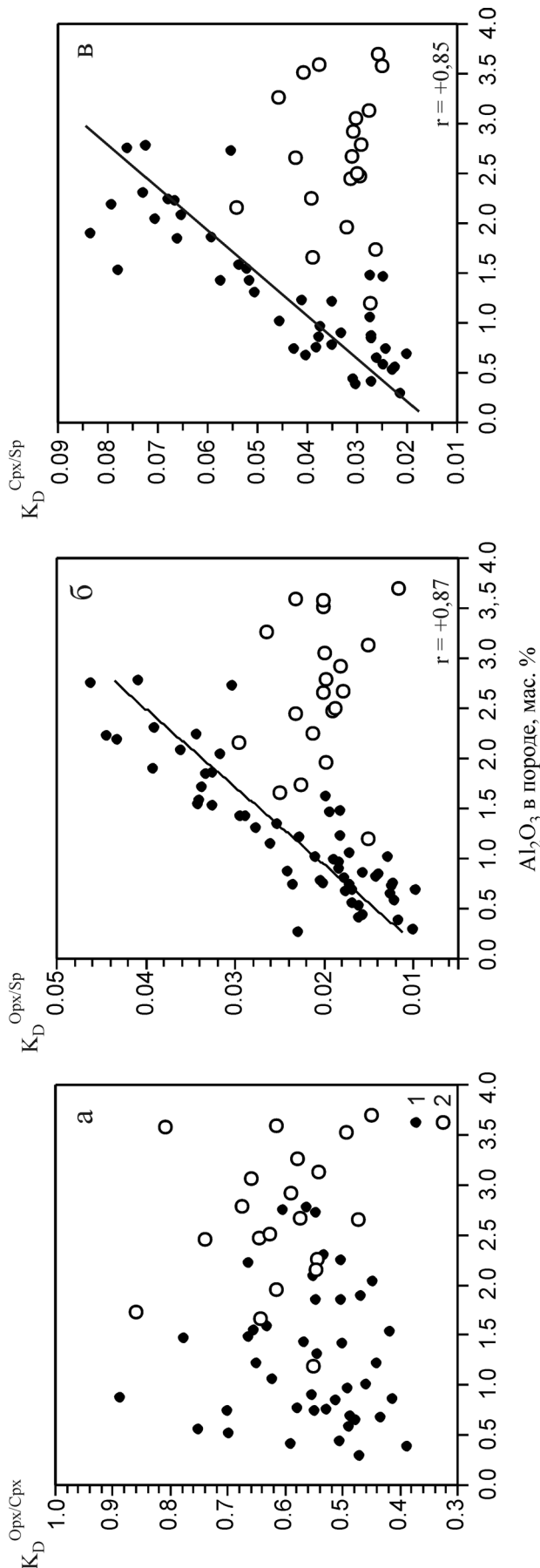


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения хрома между сосуществующими минералами в дунит-гарцбургит-лерцолитовых сериях массивов Крака и Нурали от содержания глинозема в породе.

1 – шпинелевая фаза, 2 – плагиоклазовая фаза, r – коэффициент парной корреляции.

на соответственно ниже, за счет отнесения в наших расчетах растворенной в матрице ортопироксена извести к клинопироксену. Поэтому количество нормативного клинопироксена было уменьшено, а ортопироксена соответственно увеличено на величину “ортопироксенового” клинопироксена, равную $d \times \text{орх}/c$, где d – массовая доля СаО в матрице ортопироксена, c – массовая доля СаО в клинопироксене. Эта поправка небольшая и составляет в среднем 1 мас. % пироксена. Ввиду незначительных объемов, еще меньше поправка на ламеллы клинопироксена – продукты распада первичного ортопироксена.

Сопоставление нормативного и модального пироксенов показало их хорошее соответствие: отклонение фигуративных точек от линии равенства, как правило, не превышает 5 мас. % (рис. 3).

Вклад пироксенов в баланс Cr_2O_3 рассчитывался путем умножения массовых долей Cr_2O_3 в минералах на их количество в породе. Вклад хромшпинели определялся по разности содержаний Cr_2O_3 в породе и в пироксенах. Затем эти абсолютные величины были пересчитаны на проценты (табл. 1).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты изучения приведены в табл. 1 и на рис. 4–6. Распределение хрома между сосуществующими минералами показано на рис. 4. Коэффициенты распределения Cr между пироксенами, с одной стороны, и хромшпинели – с другой, контролируется двумя независимыми и последовательными процессами – степенью частичного плавления и трансформацией шпинелевой фазы в плагиоклазовую. В шпинелевой фазы по мере удаления легкоплавких компонентов из пиролита коэффициенты распределения Cr между ними постепенно уменьшаются с 0.05 до 0.01 для ортопироксенов и с 0.08 до 0.02 – для клинопироксенов. При преобразовании шпинелевой фазы в плагиоклазовую величины K_D при фиксированной массовой доле глинозема в породе в пределах уменьшаются на полпорядка. Коэффициент распределения Cr между пироксенами варьирует от 0.4 до 0.9 и не зависит от этих процессов.

На рис. 5а–в показаны вклады пироксенов и хромшпинели в баланс хрома как функция массы глинозема в породе (степени частичного плавления). Обращает внимание сильная прямая корреляционная связь вклада клинопироксена с содержанием глинозема в породе ($r = 0.84$ – рис. 5б), отражающая уменьшение количества клинопироксена в рестите в ходе частичного плавления и снижение его вклада с

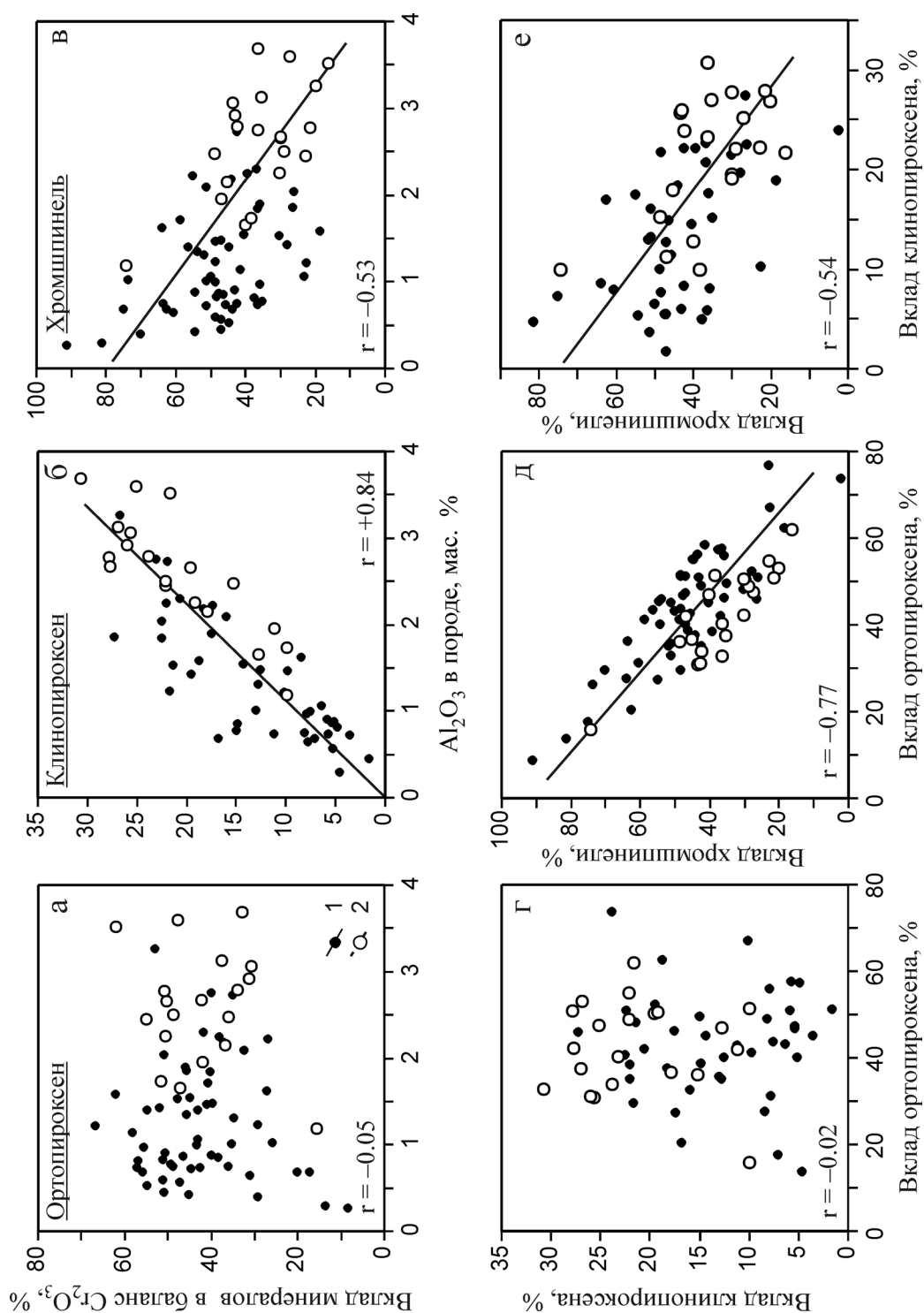


Рис. 5. Вклады породообразующих минералов в породный баланс Cr_2O_3 дуниг-гардбургит-лерцолитовых серий.

Условные обозначения см. рис. 4. а-в – вклад ортопироксена, клинопироксена и хромшпинели в баланс Cr_2O_3 как функция степени деплетирования примитивной мантии, г-д – соотношения между вкладами породообразующих минералов.

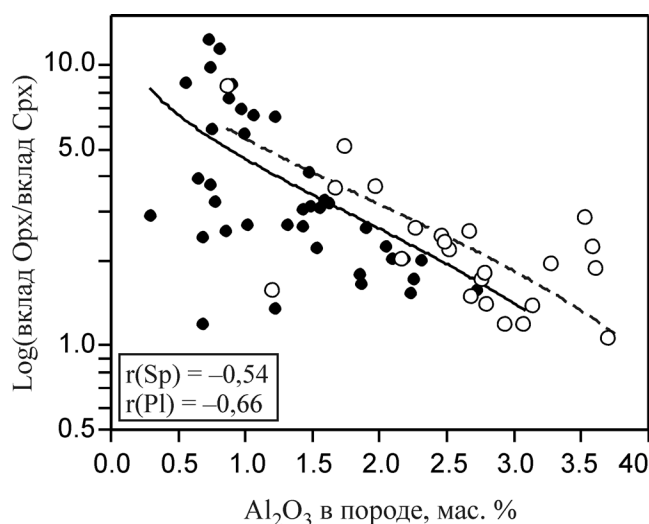


Рис. 6. Соотношение вкладов орто- и клинопироксенов в дунит-гарцбургит-лерцолитовых сериях массивов Крака и Нурали как функция степени частичного плавления.

Условные обозначения см. рис. 4.

30% до нуля. При фиксированном содержании глинозема в породе вклад клинопироксенов шпинелевой фации в среднем на 2 мас. % выше вклада клинопироксенов в плагиоклазовых лерцолитах. Как и следовало ожидать, налицо отчетливая обратная зависимость вклада хромшпинели с содержанием глинозема в породе ($r = -0.53$ – рис. 5в), свидетельствующая о возрастании ее количества в рестите и о росте вклада хромшпинели с 10 до почти 100% по мере увеличения степени частичного плавления. Как и для клинопироксенов, вклады хромшпинели в шпинелевой и плагиоклазовой фациях количественно различаются (в среднем на 5%), но в обратную сторону – в пользу плагиоклазовых лерцолитов. Вклад ортопироксена в баланс Cr_2O_3 варьирует от 10 до 70% при отсутствии какой-либо корреляции со степенью частичного плавления ($r = 0.05$ – рис. 4а). Намечается несколько больший вклад ортопироксенов шпинелевых ультрамафитов по сравнению с плагиоклазовыми.

Отмеченные закономерности подтверждаются сопоставлением вкладов минералов в породный баланс Cr_2O_3 (рис. 5д). Но здесь наиболее отчетлива обратная зависимость между вкладами хромшпинели и ортопироксена ($r = -0.77$ – рис. 5д), существенно более четкая по сравнению с зависимостью между вкладами хромшпинели и клинопироксена ($r = -0.54$ – рис. 5е). Значимой корреляции между вкладами орто- и клинопироксена не наблюдается ($r = -0.02$ – рис. 5а). Однако несомненно, что в ходе частичного плавления в лерцолитах, независимо от фации глубинности, отношение вкладов орто- и клинопироксена увеличивается в пользу первого (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Прослеживаемое на приведенных рисунках отсутствие статистических границ между шпинелевыми фациями лерцолитов, гарцбургитов и дунитов подтверждает их принадлежность к серии, образованной в ходе одноактного процесса – частичного плавления пиролита верхней мантии. Поэтому петрохимические границы между этими породами в значительной мере условны. Для обоснования границы между лерцолитами и гарцбургитами могут быть использованы точки перегибов линий на диаграммах составов минералов и на диаграммах “состав минерала–состав породы”. Известны две такие точки. Первая – экстремум на кривой соотношений массовых долей Cr_2O_3 – Al_2O_3 в орто- и клинопироксенах [7], вторая – точка перегиба линии на диаграмме соотношений массовых долей Al_2O_3 в хромшпинели и породе [8]. В обоих случаях положение этих точек отвечает 5 мас. % клинопироксена в породе, что соответствует принятой в мировой литературе границе лерцолитов и гарцбургитов [3] и не согласуется с последним изданием Петрографического кодекса России, согласно которому границу следует проводить по 10 мас. % клинопироксена [4].

Т.к. содержание хрома в породах серии постоянно и не зависит от их петрографического состава и степени частичного плавления, то закономерный рост массовой доли хромшпинели в ходе этого процесса происходит только за счет удаления хрома из пироксенов, т.е. изохимически. По-видимому, из пироксенов хром высвобождается в форме хромшпинели, о чем свидетельствует относительное постоянство состава акцессорной хромшпинели в лерцолитах (рис. 1), по величине хромистости численно близкого отношению $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al}^{\text{IV}})$ в пироксенах (в среднем 15% в хромшпинели, 14% в ортопироксене и 20% в клинопироксене). О возможности высвобождения хрома из пироксенов в форме ламелл хромшпинели, по составу аналогичной акцессорной, свидетельствуют данные по ультрамафитам юго-восточного блока Кемпирсайского массива [1]. В гарцбургитах в ходе частичного плавления по мере увеличения количества хромшпинели и уменьшения содержания глинозема в породе соотношение вкладов хромшпинели и ортопироксена контролируется перераспределением хрома и алюминия между ними (рис. 5д).

Дальнейшее перераспределение хрома наблюдается при трансформации шпинелевой фации в плагиоклазовую. При фиксированной степени частичного плавления вклад орто- и клинопироксенов в баланс Cr_2O_3 уменьшается, а хромшпинели – увеличивается.

Последующее снижение температуры минерального равновесия приводит к распаду раннего ортопироксена и частичной перебалансировке химического состава минералов. Процесс характеризуется незавершенностью и приводит к искажению отмеченных выше закономерностей вещественного состава ультрамафитов.

Таким образом, на самом раннем этапе истории эволюции вещества верхней мантии – в ходе его частичного плавления – создаются предпосылки для формирования рудных концентраций и прослеживается подвижность хрома, выраженная в закономерном росте дисперсии его содержаний в породах по мере увеличения степени частичного плавления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 14 “Научные основы эффективного природопользования, развития минерально-сырьевых ресурсов, освоения новых источников природного и техногенного сырья”, Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 2 “Эволюция литосферы, металлогенетические провинции, эпохи и рудные месторождения: от генетических моделей к прогнозу минеральных ресурсов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов В.Ю., Чашухин И.С., Вахрушева Н.В. О составе микровключений хромшпинелида в минералах несерпентинизированных гипербазитов Кемпирсайского массива // Новые и малоизученные минералы и минеральные ассоциации Урала. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1986. С 24–25.
2. Лазько Е.Е. Типоморфизм породообразующих минералов ультрабазитов // Магматические горные породы. Ультраосновные породы / Отв. ред. Е.Е. Лазько, Е.В. Шарков. М.: Наука. 1988. С. 424–441.
3. Ле Ба М., Штрекайзен А. Систематика магматических горных пород Международного союза геологических наук // Записки ВМО. 1991. Ч. 120. № 4. С. 1–20.
4. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Изд. 2. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. 198 с.
5. Управление качеством аналитической работы. Порядок и содержание работы по аттестации методик количественного анализа минерального сырья. ОСТ 41-08-205-81. М.: ВИМС, СФ ВНИИМ. 1981. 79 с.
6. Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Щапова Ю.В. Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. 310 с.
7. Чашухин И.С., Штейнберг Д.С. О поведении хрома и алюминия в ортопироксенах лерцолит-гарцбургитового ряда в ходе его формирования // Ежегодник-1991. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1992. С. 93–95.
8. Штейнберг Д.С., Чашухин И.С. О соотношении альпинотипных гарцбургитов и лерцолитов // Ежегодник-1982. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 1983. С. 68–71.
9. Godard M., Jousset D., Bodinier J.-L. Relationships between geochemistry and structure beneath a palaeo-spreading centre: a study of the mantle section in the Oman ophiolite // Earth Planet. Sci. Lett. 2000. V. 180. P. 133–148.
10. Le Roux V., Bodinier J.-L., Tommasi O. et al. The Lherz spinel lherzolite: Refertilized rather than pristine mantle // Earth Planet. Sci. Lett. 2007. V. 259. P. 599–612.
11. Nagata J., Goto A., Obata M. The parabolic pattern of chromium partitioning observed between pyroxenes and spinel from ultramafic rocks and its petrologic significance // Contrib. Miner. Petrol. 1983. V. 82. P. 42–51.
12. Rampone E., Piccardo G.B., Hofmann A.W. Multi-stage melt-rock interaction in the Mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolitic peridotites: microstructural and geochemical evidence // Contrib. Mineral. Petrol. 2008. V. 156. P. 453–475.
13. Rampone E., Romairone A., Hofmann A.W. Contrasting bulk and mineral chemistry in depleted mantle peridotites: evidence for reactive porous flow // Earth Planet. Sci. Lett. 2004. V. 218. P. 491–506.
14. Takazawa E., Frey F.A., Shimizu N., Obata M. Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. V. 64. № 4. P. 695–716.
15. Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 231. P. 53–72.

Рецензент А.В. Алексеев

Chromium balance during of generation of Urals dunite-harzburgite-lherzolite series

I. S. Chashchukhin

Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS

Chromium distribution between spinel, ortho- and clinopyroxenes has been studied. Mineral balance of Cr_2O_3 in 78 samples of the Kraka and Nurali ultramafite massifs has been calculated. It is shown that the two successive processes – partial melting of the upper mantle material and a transformation of the spinel facies to plagioclase ones influence on a Cr distribution between phases and their contribution to rock balance. During a removal of fusible components from pyrolite the Cr distribution coefficients between pyroxene and spinel decrease from 0.05 to 0.01 in orthopyroxene and from 0.08 to 0.02 in clinopyroxene. In this way the contribution of clinopyroxene in Cr_2O_3 balance decreases from 30% to 0 and spinel contribution increases from 10 to 80%. A contribution of orthopyroxene varies from 10 to 70% without any correlation to a degree of partial melting. Transformation of spinel facies to plagioclase ones reduces of $K_D^{\text{Opx, Crx/Sp}}$ value in a limit of a half-order but weakly influences on mineral contributions' value to a chromium balance in the rocks.

Key words: chromium, balance, orthopyroxenes, clinopyroxenes, spinel, Kraka, Nurali.