

НОВЫЕ ДАННЫЕ ИЗУЧЕНИЯ РЕДОКС-СОСТОЯНИЯ ДУНИТ-КЛИНОПИРОКСЕНИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УРАЛА

И.С. Чашухин, С.Л. Вотяков, А.А. Ефимов, Л.Д. Булыкин

Современными методами окситермометрии с привлечением данных мессбауэровской спектроскопии впервые выполнены расчеты летучести кислорода в дунитах дунит-верлит-клинопироксенитовых комплексов ультраосновных массивов Урала – Войкаро-Сыньинского, Кемпирсайского, Верхнетагильского и Ключевского и в дунитах Гладкой Сопки Кумбинского массива Платиноносного пояса Урала, а

также получены новые данные о редокс-состоянии гарцбургит-лерцолитовой серии юго-восточного блока Кемпирсайского и дунит-гарцбургитовой ассоциации Войкаро-Сыньинского массивов. Новые данные с учетом результатов предыдущих исследований позволили: 1) сопоставить редокс-состояние дунит-гарцбургитовых и дунит-клинопироксенитовых комплексов в пределах одного ультраосновного массива; 2) срав-

Составы сосуществующих оливина и хромшпинели и результаты расчетов температуры оливин-хромшпинелевого равновесия и летучести кислорода в ультрамафитах

№ обр.	Порода	Хромшпинель, мас. %							φ, %	Т, °С	dlog fO ₂ , (FMQ)
		Fa, %	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO			
Войкаро-Сынынский массив											
6104	Дунит	13,00	0,22	9,52	52,73	32,20	0,68	6,74	25,4	750	1,2
6120	То же	9,60	0,35	24,28	36,21	26,82	0,35	11,41	36,1	760	2,1
6122	Гарцбургит	9,10	0,19	26,30	36,14	24,08	0,48	12,28	28,5	730	1,6
6124	То же	9,80	0,08	30,19	34,31	19,48	0,41	13,77	21,3	770	0,6
6126	То же	9,00	0,08	33,38	31,55	18,28	0,38	14,92	25,0	780	0,9
6128	То же	9,30	0,37	19,73	41,75	28,40	0,59	10,27	34,0	740	2,1
6268	Металерцолит	9,60	0,13	33,98	32,87	18,99	0,23	13,69	20,6	730	0,6
6274	Дунит	9,30	0,49	27,21	36,27	24,05	0,33	11,47	28,0	700	1,6
6277	Оливиновый клинопироксенит	9,70	0,24	32,36	33,07	21,62	0,29	12,54	21,3	680	1,0
6279	Дунит	9,30	0,21	16,06	47,84	26,59	0,43	8,97	26,3	710	1,5
Кемпирсайский массив, юго-восточный блок, скв. 250											
6970	Дунит	10,70	0,49	8,95	50,42	32,25	0,44	6,85	33,5	760	2,1
6974	То же	9,50	0,50	10,50	51,64	29,53	0,45	6,98	38,4	760	2,3
6977	Оливиновый клинопироксенит	11,50	0,42	12,00	50,03	30,79	0,47	6,21	31,2	710	1,7
6993	Гарцбургит	8,60	0,04	45,19	21,12	14,93	0,11	16,79	21,9	720	0,7
7008	Дунит	6,80	0,26	13,33	53,67	21,33	0,33	11,52	17,1	730	0,9
Верхнетагильский массив											
8694	Дунит	6,60	0,21	8,86	55,63	23,09	0,35	11,46	28,2	810	1,9
Ключевской массив											
8739	Дунит	6,80	0,28	10,51	54,07	25,81	0,54	8,79	25,6	680	2,0
8740	То же	7,20	0,29	11,11	51,51	26,85	0,46	8,55	29,1	690	2,3
Кумбинский массив, Гладкая Сопка											
1454a	Дунит	8,90	0,46	9,17	46,38	36,03	0,51	7,93	32,9	740	2,7
1456	То же	8,20	0,50	8,84	48,32	34,86	0,51	7,55	39,2	750	3,0
1457	То же	7,95	0,61	12,56	46,28	31,96	0,51	8,50	34,3	730	2,7
1458	То же	9,20	0,64	11,21	44,68	35,85	0,53	7,41	35,7	740	2,7
1459	То же	8,40	0,58	12,83	44,77	32,18	0,49	8,29	31,4	710	2,5
1460	То же	7,90	0,49	12,30	46,16	32,26	0,48	8,14	33,6	710	2,7

Примечание. FeO* – суммарная массовая доля железа в форме закиси, $\phi = \text{Fe}^{3+}/\text{Fe}$ в хромшпинели, %.

нить редокс-состояние дунит-клинопироксенитовых и дунит-верлитовых ассоциаций офиолитовых комплексов; 3) сопоставить редокс-состояние дунитов дунит-клинопироксенитовых комплексов Платиноносного пояса и альпинотипных массивов. Цель исследования – проследить эволюцию окислительно-восстановительного состояния ультрамафитов в ходе формирования и становления слагаемых ими массивов.

Петрографические наблюдения и данные по составу хромшпинели в породах дунит-клино-

пироксенитовой ассоциации альпинотипных массивов Урала позволяет выделить два типа комплексов: дунит-верлит-диаллагитовый (ДВДК) и дунит-клинопироксенитовый (ДКК). ДВДК изучен нами в Ключевском массиве, в левом борту р. Исеть, вблизи слияния ее с р. Сысертью (обр. 8739, 8740). Верлиты представлены средне-, крупнозернистой хромшпинель-содержащей породой массивной текстуры, без отчетливо выраженной полосчатости. Соотношение клинопироксена и оливина варьирует от 60 до 70 % в

эндоконтакте с дунитами и от 20 до 30 % в удалении от него. Переход от дунитов к верлитам резкий, на протяжении нескольких сантиметров. Дуниты свободны от клинопироксена.

ДКК наиболее полно развит в Войкаро-Сыньинском массиве. Здесь его можно подразделить на два пространственно разобщенных подтипа. В восточной периферии массива, вблизи габбро, развит грубозернистый метадунит-клинопироксенитовый комплекс с повышенным содержанием железа и титана, рудный акцессорий в клинопироксенитах представлен Ti-содержащим магнетитом. Породы этого комплекса нередко представлены тектонической брекчией, содержащей блоки грубозернистых клинопироксенистов, окруженные более пластичной дунитовой массой. Далее по направлению к внутренним частям массива обнажается собственно дунит-клинопироксенитовый комплекс (обр. 6104, правый борт руч. Труба-Ю); пироксенит сложен мелко-среднезернистым клинопироксеном черного цвета и обычно содержит оливин и акцессорную хромшпинель. Для комплекса характерно чередование дунитов и пироксенистов, создающее полосчатый облик пород. По-видимому, краевые дуниты Войкаро-Сыньинского массива (обр. 6120, левый борт долины р. Лагорта-Егарт) являются частью этого комплекса. Как правило, далее на запад начинается дунит-гарцбургитовый комплекс. Более сложный переход от дунит-гарцбургитового комплекса к дунит-клинопироксенитовому наблюдается на юге массива, в водоразделе ручьев Дзеля-Лабагей-Шор – Ыджид-Лабагей-Шор. Здесь к востоку от краевых дунитов обнажается полосчатый дунит-металерцолит-верлитовый комплекс (обр. 6268-6277), который постепенно переходит в полосчатый дунит-гарцбургитовый, с сохранением ориентировки полосчатости. В этой работе, помимо ДКК, приведены данные по гарцбургитам левого борта долины р. Лагорта-Егарт (обр. 6122-6128 – табл. 1). Вместе с ранее изученными гарцбургитами, апогарцбургитовыми дунитами и хромититами [Чашухин и др., 1996] они дают возможность охарактеризовать редокс-состояние ультрамафитов массива в целом.

В юго-восточном блоке Кемпирсайского массива скважиной 250, в интервале 875-985 м вскрыт дунит-клинопироксенитовый комплекс. Выше залегают амфиболовые гарцбургиты, ниже – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия с редкими рудными интервалами хромититов. Разрез ДКК симметричный: центр сложен дунитами, приконтактовые части – оливин-содержащими и оливи-

новыми клинопироксенитами. В отличие от остальных, все породы комплекса сульфидоносны. Изучены дуниты (обр. 6970, 6974) и оливиновый клинопироксенит (обр. 6977), а также гарцбургит – обр. 6993 и рудовмещающий дунит – обр. 7008 с глубин 1149 и 1280 м, соответственно. В Верхнетагильском массиве, в 300 м к ЮЗ от горы Тёплой отобран дунит из ДКК (обр. 8694). Для получения исчерпывающей картины редокс-состояния дунит-клинопироксенитовых комплексов Платиноносного пояса Урала по материалам А.А. Ефимова исследованы дуниты Гладкой Сопки в Кумбинском массиве (обр. 1454а-1460).

Особенности строения дунит-верлит-клинопироксенитовой ассоциации прослеживаются в составах сосуществующих оливина и хромшпинели. В дунит-верлит-диаллагитовом комплексе Ключевского массива железистость хромшпинели в дунитах по мере приближения к верлитам слабо увеличивается от 50-60 % до 60-70 % в эндоконтакте и в верлитах; хромистость в дунитах остается постоянной на уровне 75-80 % и уменьшается в верлитах до 60-70 % (рис. 1). Железистость оливина в дунитах варь-

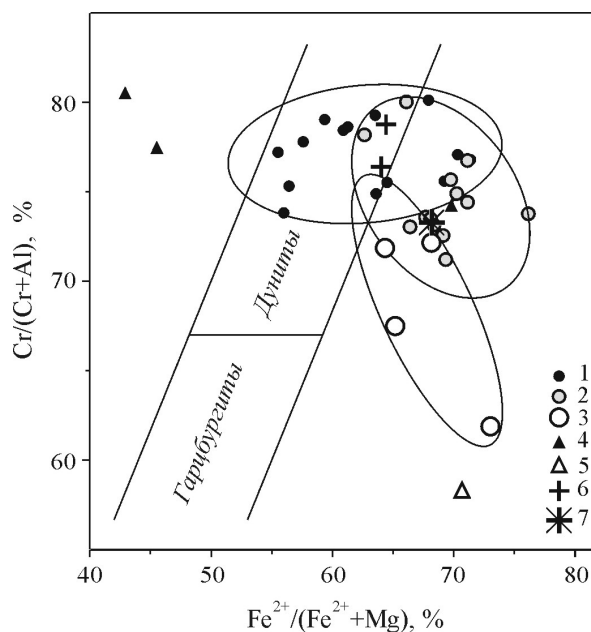


Рис. 1. Составы акцессорной хромшпинели в дунит-верлит-диаллагитовых и дунит-клинопироксенитовых комплексах Урала.

1-3 – Ключевской массив: 1-2 – дуниты: 1 – вдали от контакта с верлитами, 2 – в эндоконтакте с верлитами, 3 – верлиты; 4-5 – Верхнетагильский массив: 4 – дуниты, 5 – оливиновый клинопироксенит; 6-7 – Кемпирсайский массив: 6 – дуниты, 7 – оливиновый клинопироксенит. Показаны поля акцессорной хромшпинели дунит-гарцбургитовой серии альпийских массивов.

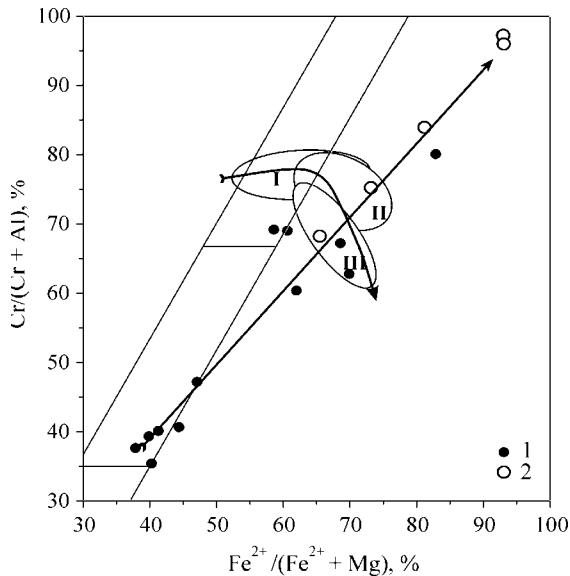


Рис. 2. Тренды составов акцессорной хромшпинели дунит-верлит-клинопироксенитовых и метадунит-клинопироксенитовых комплексов Урала.

1-2 – Войкаро-Сыньинский массив, комплексы: 1 – дунит-клинопироксенитовый, 2 – метадунит-клинопироксенитовый. Эллипсы – поля составов хромшпинелей Ключевского массива (см. рис. 1).

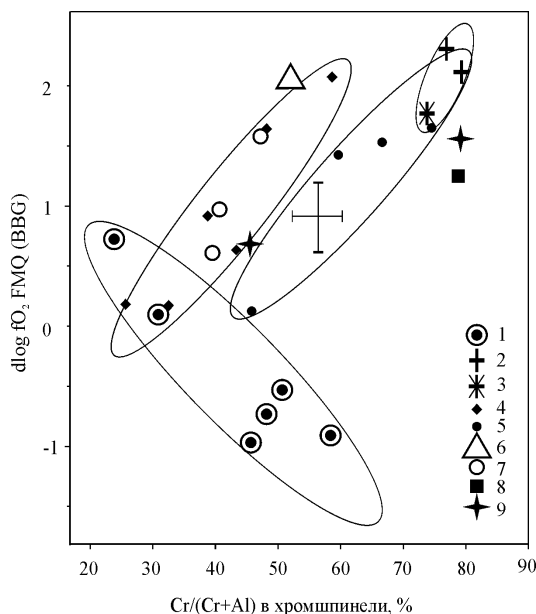


Рис. 3. Летучесть кислорода в ультрамафитах Кемпирсайского и Войкаро-Сыньинского массивов.

1-3 – Кемпирсайский массив: 1 – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия, 2-3 – дунит-клинопироксенитовый комплекс: 2 – дуниты, 3 – оливиновый клинопироксенит; 4-9 – Войкаро-Сыньинский массив: 4 – гарцбургиты, 5 – апогарцбургитовые дуниты внутренних частей массива, 6 – краевой дунит, 7-8 – дунит-клинопироксенитовый комплекс: 7 – междуречья Дзеля-Лабагей-Шор – Ыджид-Лабагей-Шор, 8 – руч. Труба-Ю, 9 – хромититы.

ирует от 6 до 8 % Fa, в верлитах повышается до 9 %. В ДКК Кемпирсайского и Верхнетагильского массивов состав хромшпинели повторяет закономерности ее состава в ДВДК (рис. 2). Железистость оливина в ДКК Кемпирсайского массива сохраняет тенденцию роста в направлении дунит – клинопироксенит, но значения Fa существенно более высокие: 9,5 % в дунитах, 11,5 % в оливиновом, 13,9 % в оливин-содержащем клинопироксенитах. В метадунит-клинопироксенитовом комплексе железистость оливина и железистость и хромистость хромшпинели в контакте с пироксенитами на протяжении последних метров стремительно увеличиваются: Fa с 8-9 % до 12-13 %, железистость и хромистость хромшпинели от 60-70 до 90-95 % (рис. 2).

Температура оливин-хромшпинелевого равновесия и величина летучести кислорода fO_2 были оценены по модернизированным геотермометру и фугометру Больхауза-Берри-Грина [Ballhaus, et al., 1991] с учетом прямого (мессбауэровского) определения степени окисления железа в хромшпинели, а также эмпирически рассчитанного влияния степени вхождения титана в структуру хромшпинели на коэффициент распределения железа и магния между оливином и хромшпинелью [Чашухин и др., 1996]. Всего изучено 24 образца. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

Для решения первой поставленной задачи на рис. 3 приведены данные о редокс-состоянии ультрамафитов Войкаро-Сыньинского и юго-восточного блока Кемпирсайского массивов. В Кемпирсайском массиве летучесть кислорода в породах дунит-клинопироксенитового комплекса почти на два порядка выше, чем в дунит-гарцбургит-лерцолитовой серии, что, несомненно, свидетельствует о разных условиях их формирования. В противоположность Кемпирсайскому, летучесть кислорода во всех ультрамафитах Войкаро-Сыньинского массива, включая гарцбургиты, апогарцбургитовые дуниты, краевые дуниты, хромититы и породы ДКК варьирует в одних и тех же пределах и равна $1,0 \pm 1,0$ ед. $\log$ относительно буфера FMQ. Основываясь на этих данных, можно высказать предположение о том, что, по крайней мере, становление массива проходило в одинаковых оксидометрических условиях.

Летучесть кислорода в породах дунит-верлит-диаллитовых и дунит-клинопироксенито-

вых комплексов независимо от массива и пояса в пределах погрешности определений одинакова ($+2,1 \pm 0,2$ ед. $\log fO_2$ относительно буфера FMQ). Исключение составляют породы Войкаро-Сыньинского массива. Их меньшая окисленность (от $+0,6$ до $+2,0$ ед. $\log fO_2$) отражает, по-видимому, латеральные вариации редокс-состояния.

Гладкая Сопка в Кумбинском массиве (Северный Урал) – последнее из наиболее крупных дунитовых тел Платиноносного пояса Урала, до сих пор не изученное с точки зрения оценки окислительно-восстановительного состояния [Чашухин и др., 2002]. По классификации дунитовых тел Платиноносного пояса Гладкая Сопка относится к полуавтономным [Ефимов, 1999]. Были изучены 6 образцов, относительно равномерно отобранные из дунитового тела. Расчеты летучести кислорода и температуры оливин-хромшпинелевого равновесия (рис. 4, табл. 1) показали, что дуниты Гладкой Сопки – аналоги дунитов Платиноносного пояса, входящих вместе с клинопироксенитами и габбро

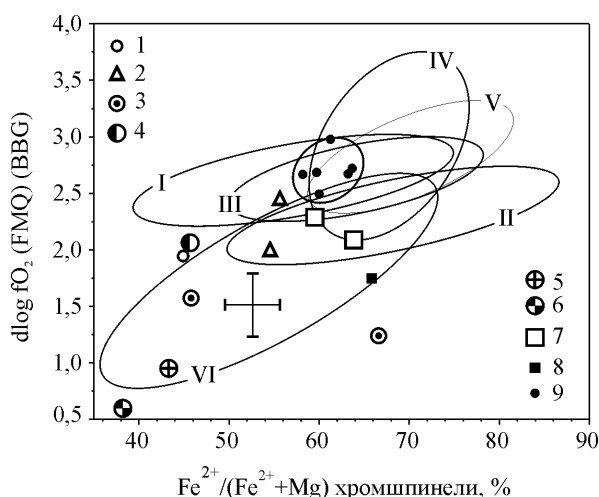


Рис. 4. Диаграмма $d\log fO_2(\text{FMQ})$ – железистость хромшпинели в породах дунит-клинопироксенитовых комплексов альпинотипных массивов и Платиноносного пояса Урала.

1-8 – дунит-клинопироксенитовые комплексы: 1 – дунит Верхнетагильского массива, 2 – дуниты Ключевского массива, 3-6 – Войкаро-Сыньинский массив: 3 – дуниты, 4 – краевой дунит, 5 – оливиновый клинопироксенит, 6 – метатерцолит, 7-8 – Кемпирсайский массив: 7 – дуниты, 8 – оливиновый клинопироксенит; 9 – дуниты Гладкой Сопки Кумбинского массива. Эллипсы – дунитовые тела Платиноносного пояса: I – г. Соловьевой, II-III – Кытлымский массив: II – Иовское тело, III – Сосновский Увал, IV-V – массив Денежкин Камень: IV – Желтая Сопка, V – малые дунитовые тела среди габброидов, VI – Уктусский массив [Чашухин и др., 2002; Ефимов и др., 2005].

в структурно-уравновешенную ассоциацию и представляющих продукт высокотемпературной аккреции («горячего меланжа»), – Сосновского Увала в Кытлымском массиве, западной части Желтой Сопки и малых дунит-клинопироксенитовых тел в массиве Денежкин Камень [Чашухин и др., 2002; Ефимов и др., 2005]. Слабые вариации железистости дунитов позволили сузить оценку погрешностей определений летучести кислорода и температуры оливин-хромшпинелевого равновесия, величины которых оказались равными $0,2-0,3$ ед. $\log fO_2$ и $20-30^\circ\text{C}$, соответственно.

Сопоставление данных по летучести кислорода ДКК альпинотипных массивов и Платиноносного пояса показали, что в целом их редокс-состояние очень близко. Такое сходство может свидетельствовать о том, что с определенного этапа истории ультрамафитового вещества, независимо от формационной принадлежности слагаемых им уральских массивов, флюидный режим в системе С-Н-О стал относительно постоянным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 04-05-64436, 04-05-64346, а также Программы ОНЗ РАН «Экспериментальные исследования эндогенных процессов», гранта Президента РФ «Поддержка ведущих научных школ» НШ-4210.2006.5 и гранта Минобразования РНП.2.1.1840.

Список литературы

- Ефимов А.А. Горячий меланж как форма сонахождения дунитов, пироксенитов и габбро в Платиноносном поясе Урала // Мат-лы Уральской летней минер. школы-99 «Под знаком платины». Екатеринбург: УГГА, 1999. С. 98-101.
- Ефимов А.А., Вотяков С.Л., Чашухин И.С. Эволюция дунитов Платиноносного пояса Урала: роль химического, температурного и кислородного факторов // Докл. АН. 2005. Т. 405. № 1. С. 93-98.
- Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Уймин С.Г. и др. ЯГР-спектроскопия хромшпинелидов и проблемы окситермобарометрии хромитовых ультрамафитов Урала. Екатеринбург: Наука. 1996. 136 с.
- Чашухин И.С., Вотяков С.Л., Пушкарев Е.В. и др. Окситермобарометрия ультрамафитов Платиноносного пояса Урала // Геохимия. 2002. № 6. С. 846-863.
- Ballhaus C., Berry R., Green D. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1991. V. 107. N 1. P. 27-40.