

УЛЬТРАМАФИТЫ МАССИВА УЗЯНСКИЙ КРАКА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2018 г. Д. Е. Савельев, Я. Н. Нугуманова, Р. А. Гатауллин, С. Н. Сергеев

Аннотация. Приведены результаты структурно-петрографического и минералого-геохимического изучения мантийных ультрамафитов массива Узьянский Крака. Показано, что массив сложен в различной степени истощенными мантийными тектонитами перидотитового состава и сходен с типичными мантийными разрезами офиолитовых ассоциаций. Основными породообразующими минералами являются высокомагнезиальный оливин, ромбические и моноклинные пироксены с низким содержанием железа. Все породообразующие минералы изученных ультрамафитов обнаруживают признаки пластической деформации. Хромшпинелиды характеризуются значительной вариацией состава по соотношению Cr/Al, при этом имеется разрыв в содержании хрома между дунитами и гарцбургитами. Содержание редкоземельных элементов близко к хондритовому, что указывает в целом на незначительную степень истощения исходного мантийного субстрата. На диаграмме в координатах Cr# – Fo фигуративные точки сосуществующих шпинелидов и оливинов изученных образцов выстраиваются в линию, направленную вдоль тренда изменения составов данных минералов в результате процесса частичного плавления неистощенного мантийного вещества. В пироксенах отмечается прямая корреляция между концентрациями основных примесных элементов — алюминия и хрома, отмечается закономерное понижение их содержаний от крупных деформированных кристаллов к необластам. Составы сосуществующих хромшпинелидов и оливинов и геохимические особенности пород свидетельствуют о том, что изученные перидотиты вероятнее всего являются реститами от умеренных степеней частичного плавления мантийного источника (15–20%). При последующей реоморфической трансформации произошло образование дунитов с хромитовой минерализацией на участках локализации пластического течения.

Ключевые слова: ультрамафиты, перидотиты, дуниты, хромшпинелиды, оливин, ортопироксен, офиолиты, Крака

ULTRAMAFIC ROCKS OF THE UZYANSKY KRAKA MASSIF (THE SOUTHERN URALS)

D. E. Saveliev, Ya. N. Nugumanova, R. A. Gataullin, S. N. Sergeev

Abstract. We present some results of structural, petrographical, mineralogical and chemical studies of mantle ultramafic rocks of the Uzyansky Kraka massif. It is shown that the massif is composed of different depleted mantle peridotite tectonites. These are similar to ordinary mantle sections of ophiolite assemblages. The main rock-forming minerals are olivine (Fo 91–93), low-Fe orthopyroxene and clinopyroxene. All these demonstrate a deformation structure. Chromian spinels have a wide Cr/Al variations with a gap of Cr-contains between dunites and peridotites. REE-contains of ultramafic rocks are similar to chondritic one. This means that a mantle source was depleted insignificantly. On the Cr# – Fo diagram, all points form a trend parallel to a fertile mantle source partial melting direction. Pyroxenes demonstrate a positive correlation between aluminium and chromium, the main impurities concentrations. It is observed that Al and Cr content decrease from deformed porphyroblasts to neoblasts. The compositions of coexisting olivine and chromian spinel and chemical peculiarities of rocks show that studied peridotites were formed as restite from moderate partial melting (15–20%) of mantle source. A successive rheomorphic transformation have formed numerous dunite bodies with chromitite mineralizations in the places of plastic flow localization.

Keywords: ultramafic rock, peridotite, dunite, chrome spinel, olivine, orthopyroxene, ophiolite, Kraka

Для цитирования: Савельев Д.Е., Нугуманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н. Ультрамафиты массива Узьянский Крака (Южный Урал) // Геологический вестник. 2018. №3. С. 79–97. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-3-6>.

For citation: Saveliev D.E., Nugumanova Ya.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N. Ultramafic rocks of the Uzyansky Kraka massif (the Southern Urals) // *Geologicheskii vestnik*. 2018. No.3. P. 79–97. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-3-6>.

Введение

Офиолитовые ультрамафиты пользуются широким распространением в структуре складчатого пояса Урала. Одним из наиболее крупных комплексов на Южном Урале является Кракинский, который включает четыре массива общей площадью около 900 км². Массивы Южный и Средний Крака довольно хорошо освещены в литературе благодаря расположенным в их пределах многочисленным месторождениям и рудопроявлениям хромититов. Массивы Северный и Узьянский являются менее изученными, и данная статья в некоторой степени восполняет существующий пробел. Наиболее исследованными на массиве Узьянский Крака являются тела гранатовых габброидов и пироксенитов, расположенные в его центральной части [Русин, 2002], в несколько меньшей степени изучен состав аксессуарных хромшпинелидов [Чашухин и др., 2007].

Целью настоящей работы является выявление минералого-геохимических и структурных особенностей ультрамафитов мантийного разреза массива Узьянский Крака. Основными задачами исследования являются: определение минерального состава пород, установление характера рудной минерализации и последовательности минералообразования.

Фактический материал

Геологическое строение. Массив Узьянский Крака на современном эрозионном срезе представлен в виде овала, вытянутого в меридиональном направлении на 12 км при ширине около 3,5 км (рис. 1). По площади (40 км²) он уступает другим массивам и его внутренняя часть практически полностью сложена породами мантийного разреза — шпинелевыми перидотитами с подчиненными телами дунитов (рис. 2). Наиболее обычным вторичным процессом, проявленным в ультрамафитах, является низкотемпературная серпентинизация (петельчатый серпентин, хризотил, лизардит). Содержание минералов группы серпентина в ультрамафитах внутренней части массива изменяется от 30 до 80%, полная серпентинизация отмечается на тектонических границах блоков. Незначительным распространением в пределах массива пользуются жильные образования, представленные небольшими телами пироксенитов и габброидов [Савельев и др., 2008].

По периферии ультрамафиты полностью превращены в лизардитовые и хризотилитовые серпен-

тиниты, которые образуют непрерывную зону преимущественно моноклинового меланжа шириной 0,5–2,5 км. Редко среди серпентинитов встречаются будины кремнистых пород, кварцевых песчаников и родингитов.

В обнажениях перидотиты обычно представлены трещиноватыми, выветрелыми породами коричневого цвета, иногда с зеленоватым оттенком (см. рис. 2). Основная масса сложена оливином. На коричневатобурой корке выветривания наблюдаются таблитчатые зерна ортопироксена с характерным перламутровым блеском, также встречаются небольшие зерна хромшпинелида.

Петрографический состав и структурные особенности ультрамафитов. При изучении пород под микроскопом и по данным рентгенофазового анализа был определен следующий минеральный состав перидотитов (рис. 3): оливин 30 об.%, моноклиновый пироксен до 5 об.%, ромбический пироксен 3 об.%, хромшпинелид 0,5–3 об.%; главным вторичным минералом является петельчатый серпентин (от 14 до 100 об.%) и сопутствующий ему пылевидный магнетит (до 2–5 об.%), реже встречаются тальк (до 1 об.%), хлорит (до 1 об.%). Наиболее типичными являются псевдопорфировая текстура и петельчатая структура пород. Основная масса представлена серпентинизированным оливином, на фоне которого выделяются более крупные таблитчатые кристаллы менее измененного ортопироксена (рис. 4).

Оливин является главным породообразующим минералом ультрамафитов мантийного разреза. Он представлен субидiomорфными зернами размером от 0,1 до 2 мм, разбитыми сетью микротрещин, вдоль которых развивается петельчатый серпентин (см. рис. 4б, г; рис. 5б, г). Во многих кристаллах оливина фиксируются структуры, сформированные в результате пластической деформации. К ним относятся полосы пластического излома, неоднородное погасание различно ориентированных блоков минерала.

Хромшпинелид постоянно присутствует в ультрамафитах в небольших количествах (от 0,1 до 5 об.%), его окраска, размеры и морфологические особенности зерен варьируют в значительном диапазоне. В тонких срезах перидотитов хромшпинелиды просвечивают от светложелтого до темно-коричневого, наиболее густая окраска характерна для аксессуарных минералов из дунитов и рудообразующих хромшпинелидов (рис. 6).

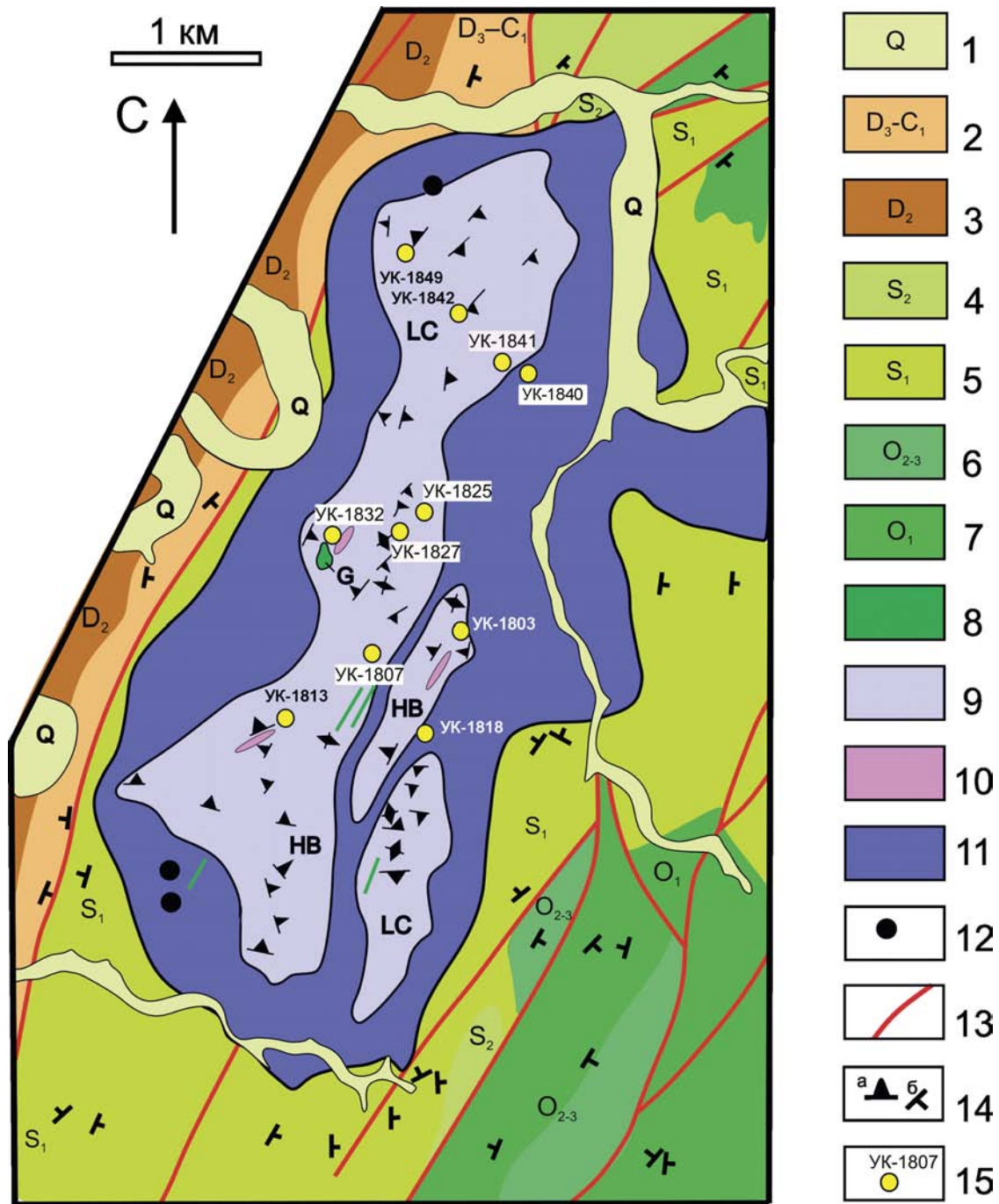


Рис. 1. Геологическое строение ультрамафитового массива Узьянский Крака. Составлена с использованием данных работ [Савельева, 1987; Савельев и др., 2008]

Условные обозначения: 1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — верхний девон — нижний карбон, полимиктовые песчаники, алевролиты; 3 — средний девон, известняки; 4 — верхний силур, доломиты; 5 — нижний силур, глинистые сланцы; 6 — средний — верхний ордовик, кварцевые песчаники и гравелиты; 7 — нижний ордовик, глинистые сланцы; 8 — габбро; 9 — шпинелевые перидотиты; 10 — шпинелевые перидотиты с выделениями дунитов; 11 — серпентиниты; 12 — проявления хромититов; 13 — разрывные нарушения; 14 — элементы залегания: а — полосчатости в ультрамафитах, б — слоистости во вмещающих породах; 15 — точки отбора образцов.

Fig. 1. Sketch geological map of Uzyansky Kraka ultramafic massif. After works [Savelieva, 1987; Saveliev et al., 2008]

Legend: 1 — Quaternary alluvial deposits; 2 — Upper Devonian — Lower Carboniferous, polymictic sandstones, aleurolites; 3 — Middle Devonian, limestones; 4 — Upper Silurian, dolomites; 5 — Lower Silurian, clay shales; 6 — Viddle — Upper Ordovician, quartz sandstones and gravelites; 7 — Lower Ordovician, clay shales; 8 — gabbro; 9 — spinel peridotites; 10 — spinel peridotites with dunite bodies; 11 — serpentinites; 12 — chromitite occurrences; 13 — faults; 14 — structural elements: a — banding and foliation in ultramafic rocks; b — lamination in country rocks; 15 — sampling points.

В перидотитах хромшпинелиды представлены ксеноморфными либо гипидиоморфными зернами, размеры варьируют в значительном диапазоне — от первых микрон до 1 мм и более (рис. 5–7). Наиболее тонкие выделения встречаются на гра-

ницах субзерен пластически деформированных оливинов и ортопироксенов, одни из подобных примеров представлен на рис. 7в, д. Более крупные кристаллы часто имеют ответвления, захватывающие фрагменты силикатов (см. рис. 6ж, з; рис. 7б).

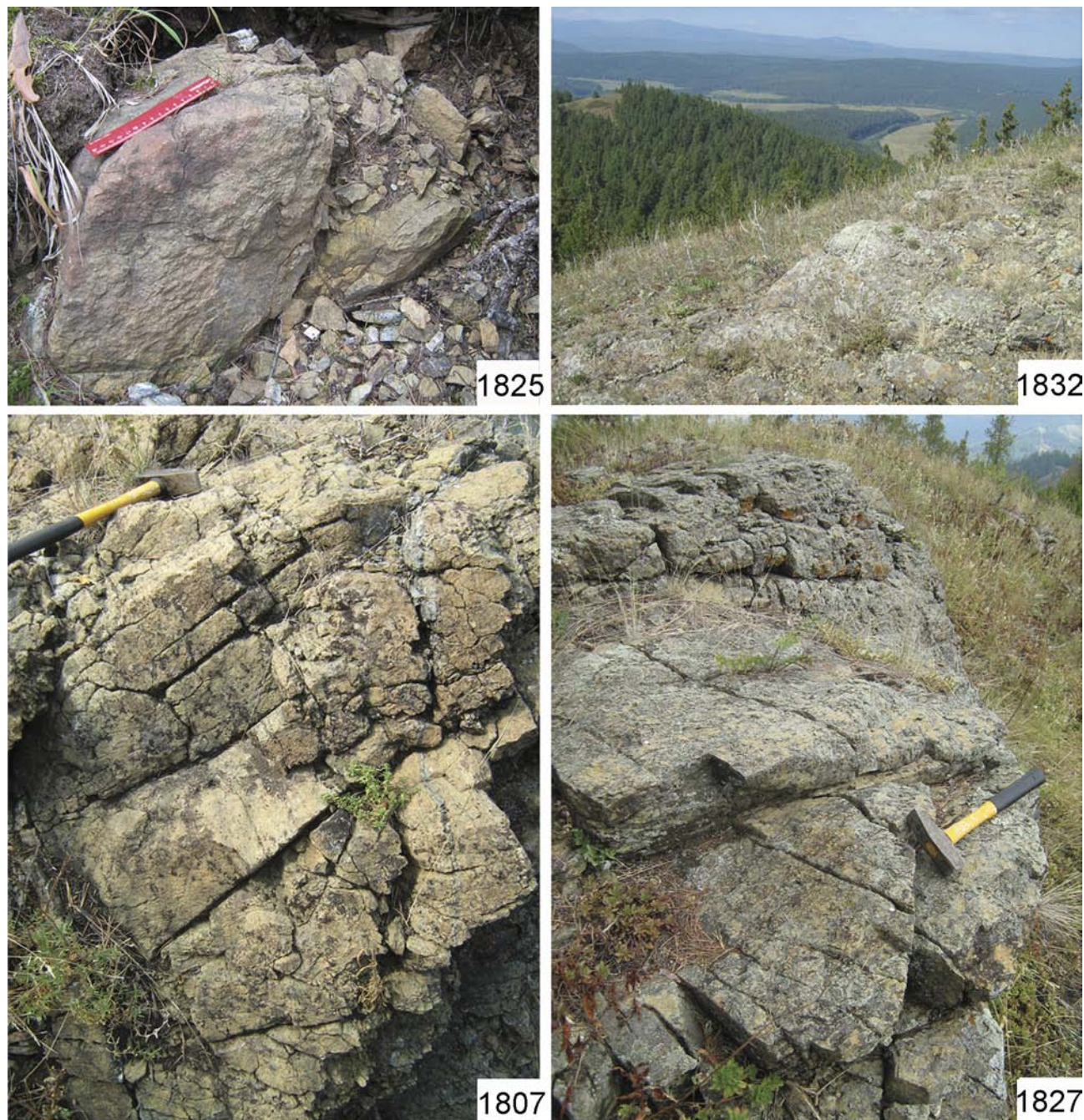


Рис. 2. Типичные обнажения ультрамафитов в центральной части массива Узьянский Крака

Примечание: в правых нижних частях снимков указаны номера обнажений.

Fig. 2. Typical outcrops of ultramafic rocks in the central part of Uzyansky Kraka

Note: numbers of outcrops are shown in the right below parts of photos.

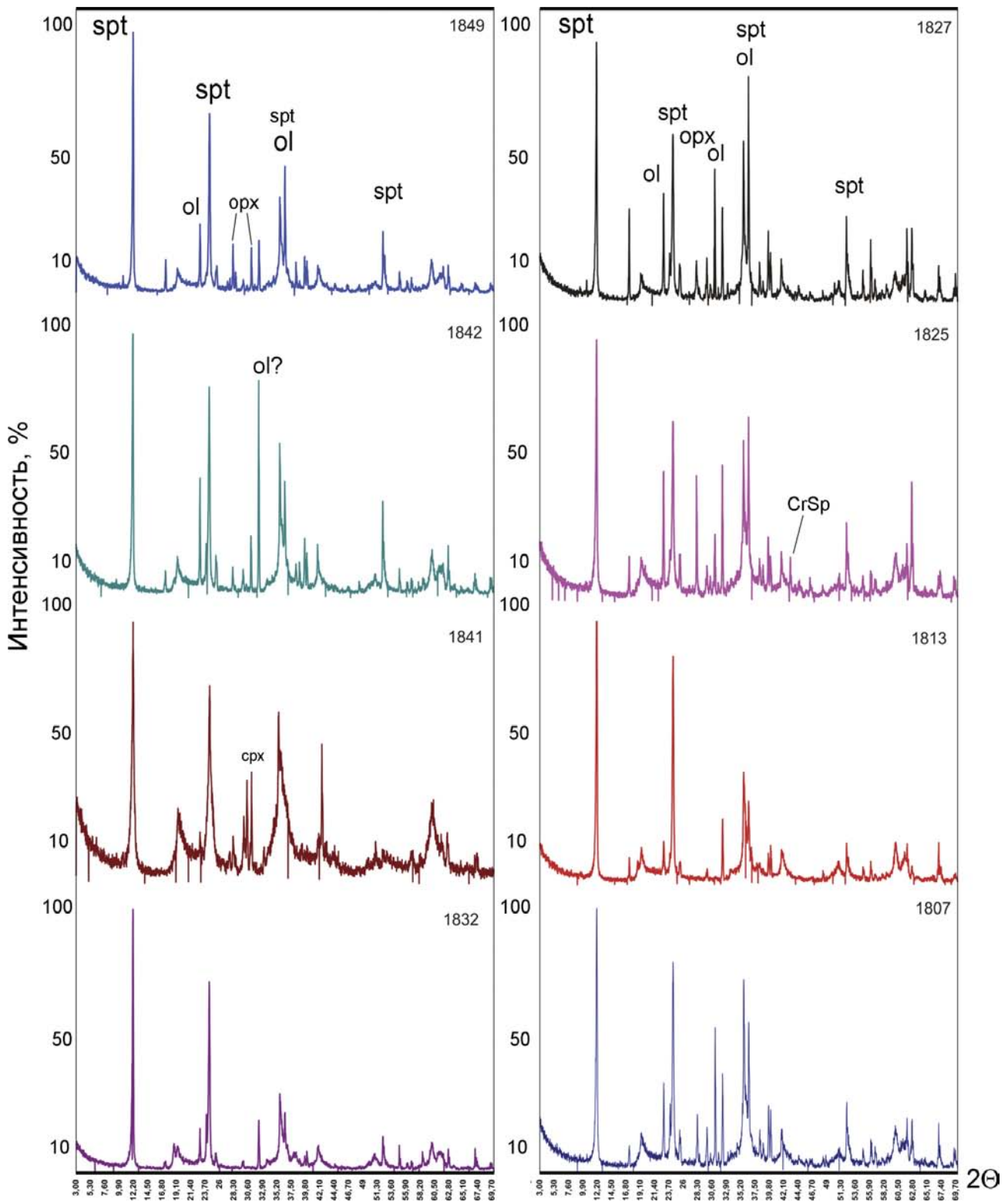


Рис. 3. Минеральный состав ультрамафитов по данным рентгенофазового анализа

Примечание: spt — серпентин, орх — ортопироксен, срх — клинопироксен, ол — оливин, CrSp — хромшпинелид.

Fig. 3. Mineralogical composition of ultramafic rocks defined with XRD

Note: spt — serpentine, орх — orthopyroxene, срх — clinopyroxene, ол — olivine, CrSp — chromian spinel.

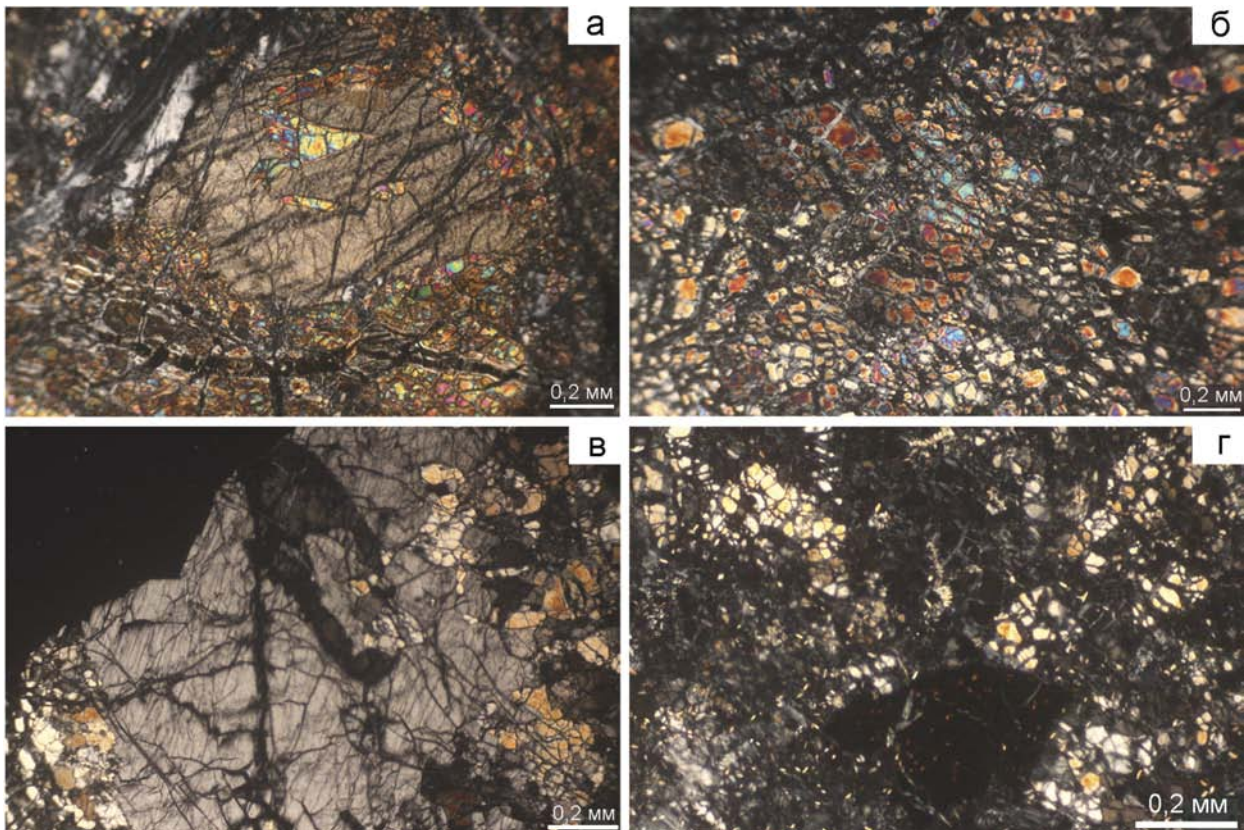


Рис. 4. Микроскопическое строение серпентинизированных перидотитов и дунитов

Примечание: а, в — крупные кристаллы ортопироксена среди серпентинизированного оливина; б, г — типичная петельчатая структура серпентинизированного оливина; снимки в плоско-поляризованном проходящем свете, николи скрещены.

Fig. 4. Microscopical composition of serpentinized peridotites and dunites

Note: а, в — porphyroclasts of orthopyroxene among serpentinized olivine; б, г — typical mesh texture of serpentinized olivine; photomicrograph in the cross-polarized transmitted light.

Акцессорные хромшпинелиды из дунитов обладают большим идиоморфизмом (см. рис. 6з), при этом часто зерна являются округлыми (см. рис. 7в) и так же, как в перидотитах, осложнены тонкими ответвлениями.

Ромбический пироксен встречается в виде табличчатых и призматических кристаллов размером 0.5–2 мм (см. рис. 4а, в; рис. 5а). В отдельных крупных зернах отмечается начальная стадия разориентировки блоков, выраженная в неоднородном погасании; внутри них часто развиты закономерные вроски (ламелли) моноклинного пироксена. В большинстве случаев зерна ортопироксена частично или полностью замещены тальком и серпентином.

Моноклинный пироксен в перидотитах наблюдается в виде более мелких неправильных зерен размером 0.15–0.4 мм (см. рис. 5б; рис. 7г), в шлифах бесцветен. Вторичные изменения пироксенов проявлены в образовании баститовых псевдомор-

фоз, в большей степени это характерно для ортопироксена.

Состав породообразующих и акцессорных минералов. Химические составы породообразующих минералов и акцессорных хромшпинелидов приведены в таблицах 1–4. Моноклинный пироксен из перидотитов представлен диопсидом с низкими содержаниями железа (менее 1.93 мас. % FeO) и алюминия (до 2.77 мас. % Al_2O_3), главным примесным элементом является хром (до 1.12 мас. % Cr_2O_3), в одном анализе обнаружен титан (0.32 мас. % TiO_2).

Ромбический пироксен представлен высокомагнезиальной разновидностью — энстатитом, он характеризуется незначительным содержанием железа (5.14–6.23 мас. % FeO) и алюминия (до 2.31 мас. % Al_2O_3). Наиболее значимые элементы-примеси представлены кальцием (0.23–0.76 мас. % CaO), хромом (до 0.62 мас. % Cr_2O_3), марганцем (до 0.28 мас. % MnO).

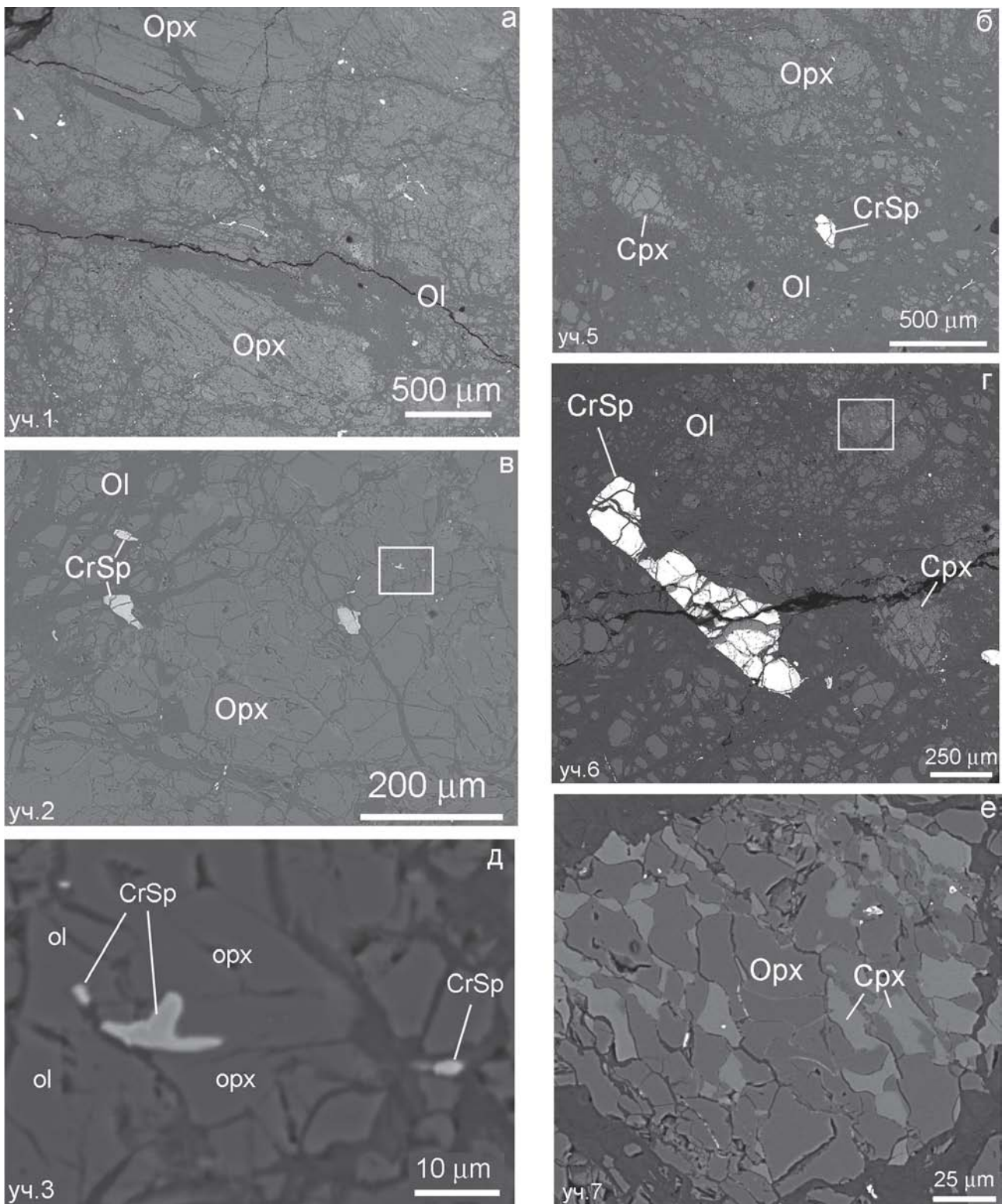


Рис. 5. Особенности микроструктуры ультрамафитов

Примечание: снимки в режиме BSE.

Fig. 5. Microstructural peculiarities of ultramafic rocks

Note: BSE-images.

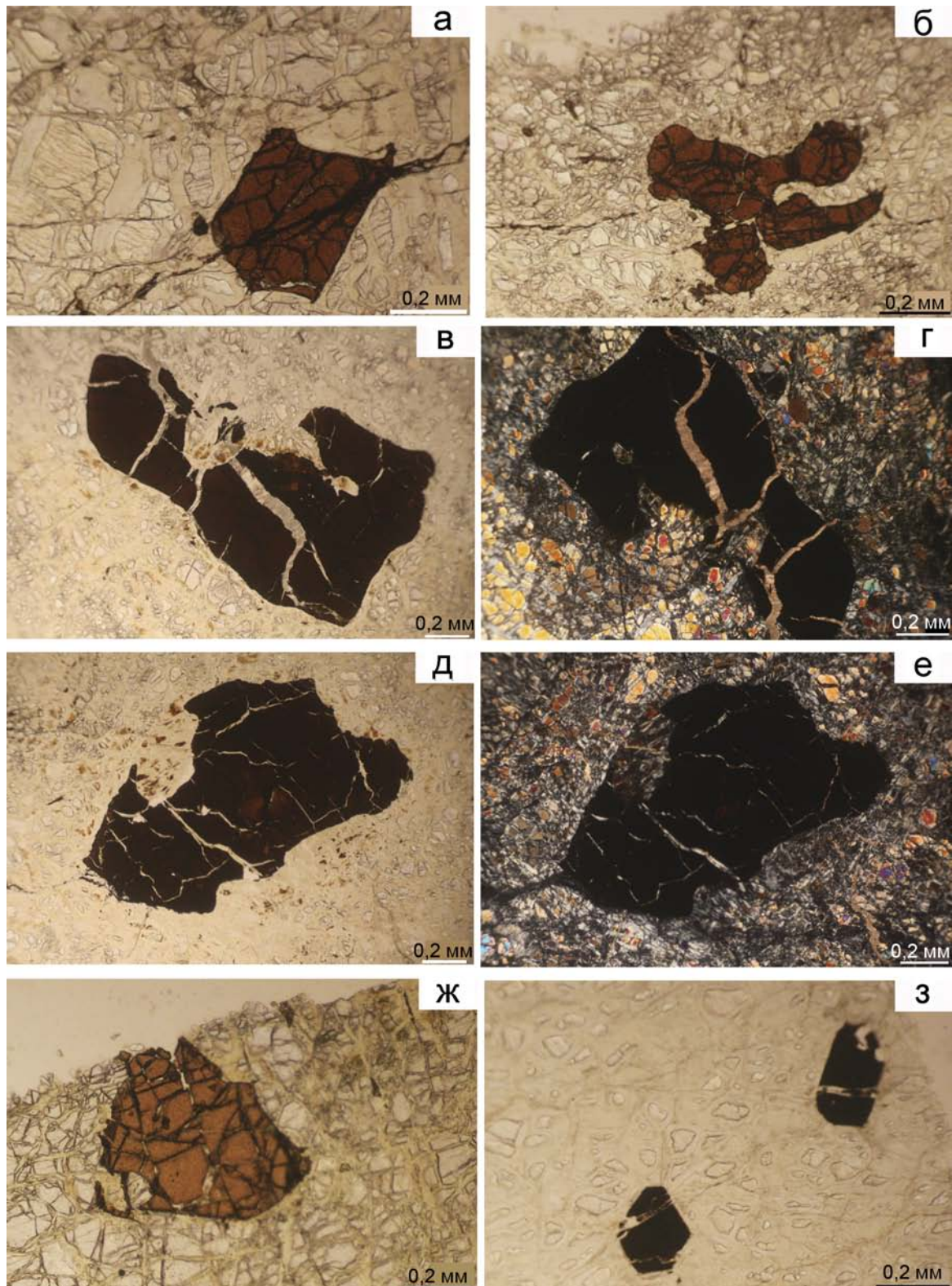


Рис. 6. Вариации форм выделения и окраски аксессуарных хромшпинелидов

Примечание: снимки в плоско-поляризованном проходящем свете; г, е — николи скрещены.

Fig. 6. Morphological and color variations of accessory chromian spinels

Note: photomicrographs in the transmitted light; г, е — cross-polarized light.

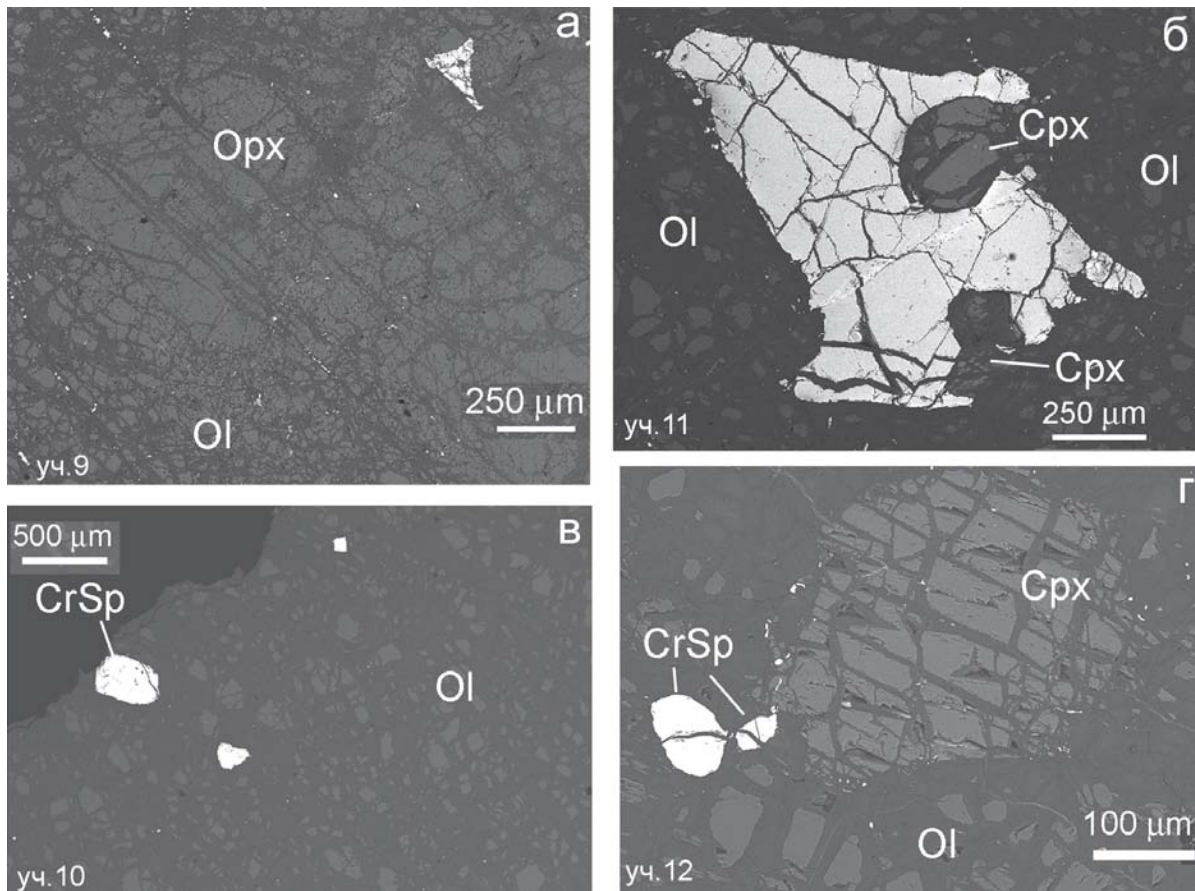


Рис. 7. Вариации форм выделения акцессорных хромшпинелидов в перидотитах и дунитах

Примечание: снимки в режиме BSE.

Fig. 7. Morphological variations of accessory chromian spinels in the peridotites and dunites

Note: BSE-images.

Оливин по химическому составу близок к чистой магнезиальной разновидности — форстериту. Содержание данного минерала в изученных зернах составляет 90–93%. Основным примесным элементом является никель (до 0.44 мас. % NiO), в одном анализе зафиксирована значимая концентрация марганца (0.24 мас. % MnO).

Акцессорные хромшпинелиды демонстрируют значительные вариации состава по соотношению алюминия, хрома, магния и двухвалентного железа (см. табл. 4). Химический состав минералов находится в хорошем соответствии с оптическими свойствами минералов: наиболее густоокрашенные зерна обогащены хромом и железом, тогда как хорошо просвечивающие в проходящем свете шпинелиды представлены высокоглиноземистыми и магнезиальными разновидностями (рис. 6, 8).

На рисунке 8 представлены тройная диаграмма для трехвалентных катионов (Al–Cr–Fe³⁺) и би-

нарная — для двухвалентных катионов (Mg, Fe²⁺), входящих в состав хромшпинелидов. Для построения последней были определены числовые характеристики хромшпинелидов: $Cr\# = Cr / (Cr + Al + Fe^{3+})$ и $Mg\# = Mg / (Mg + Fe^{2+})$ в атомных количествах.

Из тройной диаграммы следует, что исследованные образцы характеризуются незначительным содержанием трехвалентного железа (<0.2 к.ф.), поскольку все фигуративные точки расположены вдоль стороны Cr–Al. Хромшпинелиды из шпинелевых перидотитов обладают повышенными содержаниями алюминия по сравнению с хромом ($Cr\# = 0.3–0.45$), некоторый рост хромистости отмечается в минералах из образца Ук-1842 ($Cr\# = 0.4–0.55$). В хромшпинелидах из дунита (образец УК-1832) наблюдается более высокое содержание хрома ($Cr\# = 0.7$), минералы окрашены в густые красно-коричневые тона либо совершенно не просвечивают в проходящем свете.

Таблица 1

Химический состав клинопироксенов (мас. %)

Table 1

Chemical composition of clinopyroxenes (wt. %)

№ обр.	УК-1841	УК-1841	УК-1807	УК-1807	УК-1807	УК-1807	УК-1807	УК-1807	УК-1827	УК-1827	УК-1827	УК-1827	УК-1827	УК-1825	УК-1842	
№ анализа	01/001	01/004	06/059	06/060	07/065	08/071	08/073	08/074	08/078	08/080	09/089	11/116	11/111			
SiO ₂	54.14	54.33	55.17	54.95	55.11	53.35	54.07	53.39	53.73	53.53	54.18	53.83	53.57			
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Al ₂ O ₃	1.53	1.71	—	—	—	2.27	1.64	1.92	1.95	1.93	1.14	1.80	1.87			
FeO	1.65	1.64	1.57	1.76	1.53	1.70	1.56	1.74	1.64	1.80	1.93	1.50	1.55			
MgO	18.47	18.09	18.78	18.96	18.79	18.17	18.53	18.63	18.29	18.20	18.87	17.72	17.86			
CaO	23.77	23.63	24.48	24.33	24.31	23.71	23.76	23.72	23.69	23.89	23.64	23.83	24.02			
Cr ₂ O ₃	0.44	0.59	—	—	0.26	0.80	0.44	0.59	0.69	0.66	0.24	1.00	1.12			
<i>Формульные коэффициенты</i>																
Si	1.958	1.968	1.994	1.986	1.993	1.931	1.954	1.929	1.944	1.938	1.957	1.955	1.943			
Ti	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.009	—			
Al	0.065	0.073	—	—	—	0.097	0.070	0.081	0.083	0.082	0.049	0.077	0.080			
Fe	0.050	0.050	0.047	0.053	0.046	0.051	0.047	0.053	0.050	0.054	0.058	0.046	0.047			
Mg	0.994	0.975	1.010	1.019	1.011	0.979	0.997	1.002	0.985	0.980	1.014	0.958	0.964			
Ca	0.921	0.917	0.948	0.942	0.942	0.919	0.920	0.918	0.918	0.927	0.915	0.927	0.934			
Cr	0.012	0.017	—	—	0.007	0.023	0.013	0.017	0.020	0.019	0.007	0.029	0.032			
<i>Мшталы</i>																
En	0.506	0.502	0.504	0.506	0.506	0.502	0.508	0.508	0.504	0.500	0.510	0.496	0.496			
Fs	0.025	0.026	0.024	0.026	0.023	0.026	0.024	0.027	0.025	0.028	0.029	0.024	0.024			
Wo	0.469	0.472	0.473	0.468	0.471	0.472	0.468	0.466	0.470	0.472	0.460	0.480	0.480			

Таблица 3

Химический состав оливинов (мас. %)

Table 3

Chemical composition of olivines (wt. %)

№ обр	УК-1841	УК-1813	УК-1807	УК-1807	УК-1827	УК-1827	УК-1825	УК-1825	УК-1832	УК-1842	УК-1842	УК-1842
№ анализа	01/005	04/033	06/058	07/068	08/072	08/081	09/090	09/095	10/010	11/011	11/011	12/012
SiO ₂	40.27	40.38	40.29	40.37	40.40	40.68	40.23	40.19	40.51	40.59	40.38	40.49
FeO	7.55	7.43	7.74	7.53	7.60	7.71	8.46	8.63	7.59	6.51	7.46	7.70
MgO	51.83	51.85	51.63	51.67	51.69	51.18	50.91	50.82	51.57	52.57	51.67	51.45
MnO	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
NiO	0.36	0.34	0.35	0.44	0.31	0.42	0.40	0.36	0.33	0.33	0.49	0.36
<i>Формульные коэффициенты</i>												
Si	0.974	0.976	0.975	0.977	0.977	0.987	0.978	0.977	0.980	0.971	0.977	0.981
Fe	0.153	0.150	0.157	0.152	0.154	0.156	0.172	0.175	0.153	0.159	0.151	0.156
Mg	1.867	1.867	1.861	1.862	1.863	1.849	1.843	1.840	1.860	1.863	1.863	1.856
Mn	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni	0.007	0.007	0.007	0.009	0.006	0.008	0.008	0.007	0.007	0.006	0.010	0.007
<i>Минералы</i>												
Fo	0.924	0.926	0.922	0.924	0.924	0.922	0.915	0.913	0.924	0.921	0.935	0.923
Fa	0.076	0.074	0.078	0.076	0.076	0.078	0.085	0.087	0.076	0.079	0.065	0.073

Таблица 4

Table 4

Химический состав хромшпинелидов (мас. %)

Chemical composition of chromian spinels (wt. %)

№ обр	УК-1841	УК-1841	УК-1807	УК-1807	УК-1827	УК-1827	УК-1825	УК-1825	УК-1832	УК-1832	УК-1842	УК-1842	УК-1842	УК-1842	УК-1842	УК-1842
	01/002	02/012	05/039	05/040	08/069	08/070	08/083	09/084	10/097	10/098	11/108	11/107	11/110	11/106	11/109	11/105
№ анализа																
Cr ₂ O ₃	35.16	32.85	36.50	33.20	30.42	33.13	28.29	31.88	51.45	51.88	36.05	37.43	42.50	42.60	39.06	42.70
Al ₂ O ₃	33.26	35.81	31.84	34.77	38.56	36.21	40.20	36.54	14.50	14.52	32.87	30.23	25.73	25.52	29.05	25.46
FeO	17.47	16.55	16.97	16.70	14.39	14.81	14.59	16.07	22.77	22.49	15.20	16.77	17.38	17.49	17.57	17.58
MgO	14.11	14.79	14.70	15.34	16.32	15.85	16.65	15.29	10.65	11.10	15.61	14.94	13.95	13.97	13.88	13.75
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	—	0.22	0.32	—	0.27	0.36	0.43	0.43	0.45	0.51
V ₂ O ₃	—	—	—	—	0.31	—	0.27	—	0.31	—	—	0.27	—	—	—	—
ZnO	—	—	—	—	—	—	—	—	0.47	—	—	—	—	—	—	—
Сумма	100	100	100	100	100	100	100	100	100.47	100	100	100	100	100	100	100
Формульные коэффициенты																
Cr	0.814	0.750	0.846	0.759	0.681	0.750	0.628	0.724	1.311	1.322	0.828	0.873	1.015	1.018	0.920	1.021
Al	1.148	1.219	1.100	1.184	1.286	1.222	1.331	1.236	0.551	0.552	1.126	1.051	0.916	0.909	1.020	0.908
Fe ⁺³	0.044	0.043	0.044	0.065	0.021	0.022	0.042	0.043	0.121	0.121	0.044	0.067	0.068	0.068	0.045	0.046
Fe ⁺²	0.379	0.351	0.367	0.331	0.317	0.331	0.296	0.338	0.479	0.471	0.321	0.340	0.363	0.366	0.388	0.394
Mg	0.616	0.636	0.642	0.661	0.688	0.676	0.697	0.654	0.511	0.533	0.676	0.656	0.628	0.629	0.616	0.620
Ti	—	—	—	—	—	—	—	0.005	0.008	—	0.006	0.008	0.010	0.010	0.010	0.012
V	—	—	—	—	—	—	0.006	—	0.008	—	—	0.006	—	—	—	—
Zn	—	—	—	—	—	—	—	—	0.011	—	—	—	—	—	—	—
#Cr	0.415	0.381	0.435	0.390	0.346	0.380	0.321	0.369	0.704	0.706	0.424	0.454	0.526	0.528	0.474	0.529
#Mg	0.619	0.644	0.636	0.666	0.685	0.672	0.702	0.659	0.516	0.531	0.678	0.659	0.634	0.632	0.614	0.611

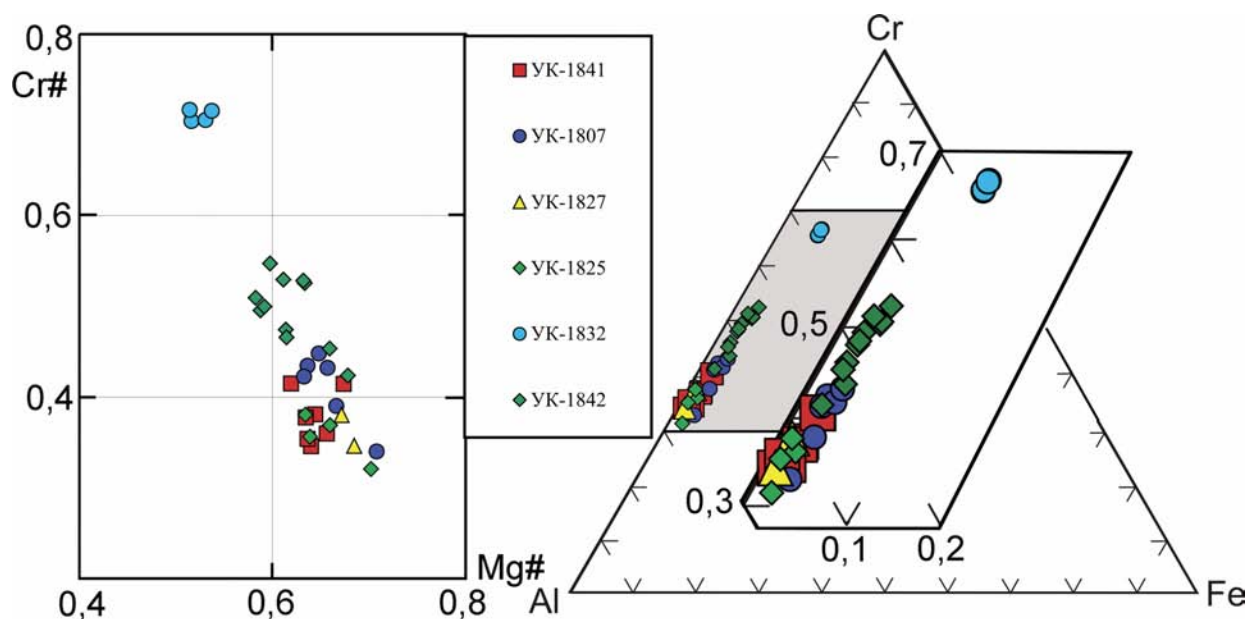


Рис. 8. Вариации состава акцессорных хромшпинелидов в перидотитах и дунитах массива Узьянский Крака

Fig. 8. Compositional variations of accessory chromian spinels in the peridotites and dunites of Uzyansky Kraka massif

На тройной диаграмме проявлен четкий тренд увеличения хромистости шпинелидов от перидотитов к дунитам и незначительное увеличение в этом же направлении содержания трехвалентного железа. Наблюдается также разрыв в содержании хрома между дунитом образца Ук-1832 и остальными образцами.

На бинарной диаграмме в координатах Mg# — Cr# также наблюдается отчетливый тренд уменьшения магнезиальности минералов с увеличением хромистости. Отношение концентрации железа к магнию во всех образцах меньше 1. Наиболее магнезиальными являются наиболее глиноземистые шпинелиды из перидотитов (Mg# = 0.7–0.8), а наиболее железистыми — минералы с повышенной хромистостью из дунитов образца УК-1832 (Mg# = 0.55).

Валовые химические составы пород приведены в табл. 5. Большая часть образцов демонстрирует высокие потери при прокаливании, что указывает на значительную степень серпентинизации ультрамафитов. Во всех изученных образцах зафиксированы низкие концентрации щелочей и титана, содержание CaO варьирует в пределах 0.27–2.91 мас. %, оно напрямую зависит от присутствия в породах клинопироксена и минимально в дунитах. Концентрация Al₂O₃ изменяется от 0.43 до 2.7 мас. %, минимальные значения характерны для дунитов, а наиболее высокие — для лерцолитов с повы-

шенными содержаниями диопсида и высокоглиноземистым хромшпинелидом (УК-1803, 1841, 1825, 1827). Наиболее высокое отношение MgO/SiO₂ фиксируется в дунитах образца УК-1832.

Из элементов-примесей наиболее высокие концентрации характерны для никеля (1915–2954 г/т) и хрома (1560–2959 г/т), при этом минимальные концентрации последнего фиксируются в дунитах, содержащих наиболее высокохромистые шпинелиды. Причина наблюдаемого несоответствия заключается, скорее всего, в весьма неравномерном распределении хромшпинелидов в породах и лишь в меньшей степени зависит от состава минералов.

Содержания кобальта на порядок ниже, чем упомянутых выше элементов (91–122 г/т), еще ниже концентрации скандия (до 54 г/т), ванадия (до 67 г/т), циркония (24–56 г/т), цинка (36–51 г/т), рубидия (до 19 г/т) и свинца (до 24 г/т). Во всех образцах содержание меди ниже предела обнаружения, в единичных пробах зафиксированы значимые концентрации иттрия (12 г/т) и стронция (82 г/т).

В четырех пробах перидотитов определены содержания редкоземельных элементов (табл. 6, рис. 9). В двух пробах дунитов и одной перидоти- та зафиксированы близкие содержания РЗЭ при в целом незначительном дефиците легких лантаноидов по отношению к тяжелым и близкондритовом

Таблица 5

Химический состав ультрамафитов массива Узьянский Крака

Table 5

Chemical composition of ultramafic rocks of Uzyansky Kraka massif

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ образца	Ук-1803	Ук-1807	Ук-1813	Ук-1818	Ук-1825	Ук-1827	Ук-1832	Ук-1841	Ук-1842	Ук-1849
SiO ₂	39.58	37.29	36.24	38.70	36.16	38.50	34.97	40.05	35.09	36.26
TiO ₂	0.077	0.056	0.021	0.037	0.042	0.031	0.021	0.098	0.032	0.042
Al ₂ O ₃	2.46	0.63	0.43	0.73	0.76	0.70	0.49	2.70	0.55	1.51
Fe ₂ O ₃ общ	7.80	6.82	8.67	5.80	8.84	5.09	7.25	7.52	6.63	7.54
MnO	0.166	0.153	0.156	0.154	0.152	0.146	0.155	0.156	0.145	0.153
MgO	39.37	43.12	41.14	46.12	40.87	46.05	44.41	35.85	47.28	42.65
CaO	1.83	0.90	0.27	0.67	0.94	0.92	0.27	2.91	0.39	0.85
Na ₂ O	0.20	0.10	0.10	0.54	0.21	0.20	0.10	0.20	0.20	0.21
K ₂ O	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
P ₂ O ₅	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
S _{общ}	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
ППП	8.31	10.21	12.23	8.20	10.28	7.50	12.40	9.56	10.56	9.77
сумма	99.86	99.32	99.29	100.96	98.31	99.18	100.09	99.09	100.91	99.01
Sc	54	13	<5	26	9	19	19	16	10	23
V	67	28	<10	44	26	31	12	62	18	51
Cr	2548	2137	1859	2239	2521	2959	1560	2718	2098	2095
Co	109	116	119	105	105	98	122	91	115	104
Ni	1915	2422	2954	2377	2166	2656	2877	1931	2375	2251
Cu	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zn	51	45	41	44	45	39	47	46	43	36
Rb	9	5	13	19	12	6	<5	10	13	17
Sr	82	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Y	<10	12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Zr	32	47	39	30	56	34	31	42	27	24
Pb	15	11	16	<10	24	23	23	18	<10	16

Примечание: содержание петрогенных оксидов дано в массовых %, а элементов-примесей в г/т (ppm).

Note: major element oxides contains are given in wt. %, minor elements contains are given in ppm.

Таблица 6

Содержание редкоземельных элементов (г/т) в ультрамафитах массива Узьянский Крака

Table 6

REE concentrations (ppm) in the ultramafic rocks of Uzyansky Kraka massif

№	1	2	3	4	№	1	2	3	4
La	2.42	0.16	0.17	0.32	Tb	0.11	0.053	0.03	0.05
Ce	4.71	0.42	0.37	0.8	Dy	0.68	0.43	0.24	0.33
Pr	0.56	0.065	0.053	0.12	Ho	0.16	0.13	0.064	0.078
Nd	2.24	0.34	0.24	0.61	Er	0.43	0.45	0.22	0.23
Sm	0.58	0.12	0.075	0.2	Tm	0.064	0.089	0.044	0.037
Eu	0.14	0.033	0.088	0.087	Yb	0.37	0.64	0.31	0.23
Gd	0.7	0.26	0.16	0.31	Lu	0.06	0.14	0.065	0.04

Примечание: 1, 2 — шпинелевые перидотиты; 3, 4 — дуниты; анализы выполнены нейтронно-активационным методом в ГЕОХИ РАН и заимствованы из работы [Савельев и др., 2008].

Note: 1, 2 — spinel peridotites; 3, 4 — dunites; analyses were made by NAA method in GEOKHI RAS, after work [Saveliev et al., 2008].

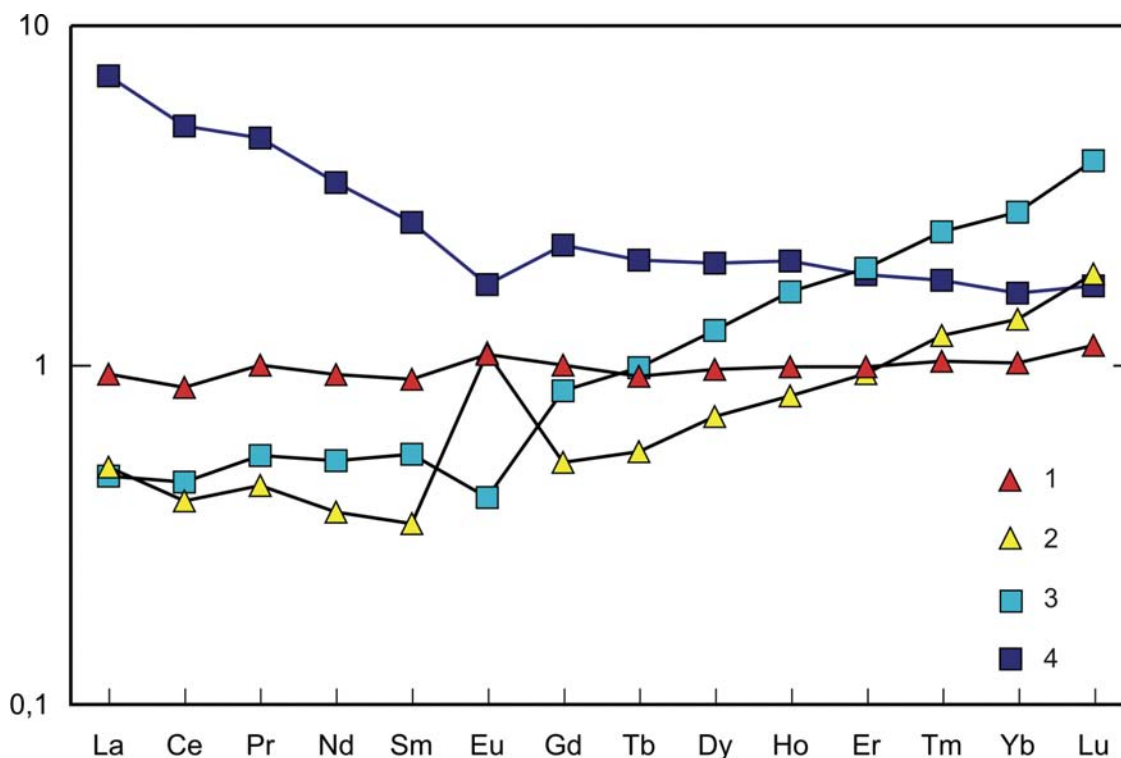


Рис. 9. Распределение редкоземельных элементов по отношению к хондриту C1 в перидотитах и дунитах массива Узянский Крака

Примечание: 1, 2 — дуниты; 3, 4 — перидотиты.

Fig. 9. Distribution of REE/chondrite C1 in the peridotites and dunites of Uzyansky Kraka massif

Note: 1, 2 — dunites; 3, 4 — peridotites.

уровне накопления всех элементов. В одной же пробе перидотита встречены значительно более высокие содержания РЗЭ с преобладанием легких элементов. Во всех четырех пробах фиксируется различное поведение европия относительно других РЗЭ — в двух случаях фиксируется отрицательная аномалия при диаметрально противоположном отношении La_N/Lu_N , в одном — положительная аномалия, и еще в одном — монотонное распределение. Таким образом, для более точного выяснения причин различий в геохимии лантаноидов необходимо проведение более детальных исследований.

Обсуждение результатов

Проведенные структурно-петрографические и минералого-геохимические исследования показали, что массив Узянский Крака сложен в различной степени истощенными мантийными тектонитами перидотитового состава. Подчиненным значением на массиве пользуются дунитовые обособления,

которые чаще всего располагаются в системе полсчатости перидотитового матрикса.

На диаграмме в координатах $Cr\#(Cr-Sp) - Fo(Ol)$ фигуративные точки сосуществующих шпинелидов и оливинов изученных образцов выстраиваются в линию, направленную вдоль тренда изменения составов данных минералов в результате процесса частичного плавления (ЧП) неистощенного мантийного вещества (ФММ) (рис. 10а). Наиболее высокоглиноземистые шпинелиды и наименее магнезиальные оливины характерны для лерцолитов УК-1825, 1827 и 1841, они попадают в поле рестита от 15%-ного плавления источника, более истощенными являются перидотиты УК-1807 и 1842 (20–25% ЧП). Если справедливы поля данной диаграммы, то дунит УК-1832 должен был образоваться при достижении 40%-ной степени частичного плавления.

Однако дунитовые тела на массиве часто имеют небольшую мощность и постепенные переходы к перидотитам с высокоглиноземистыми шпинелидами. Эти наблюдения позволяют усомниться

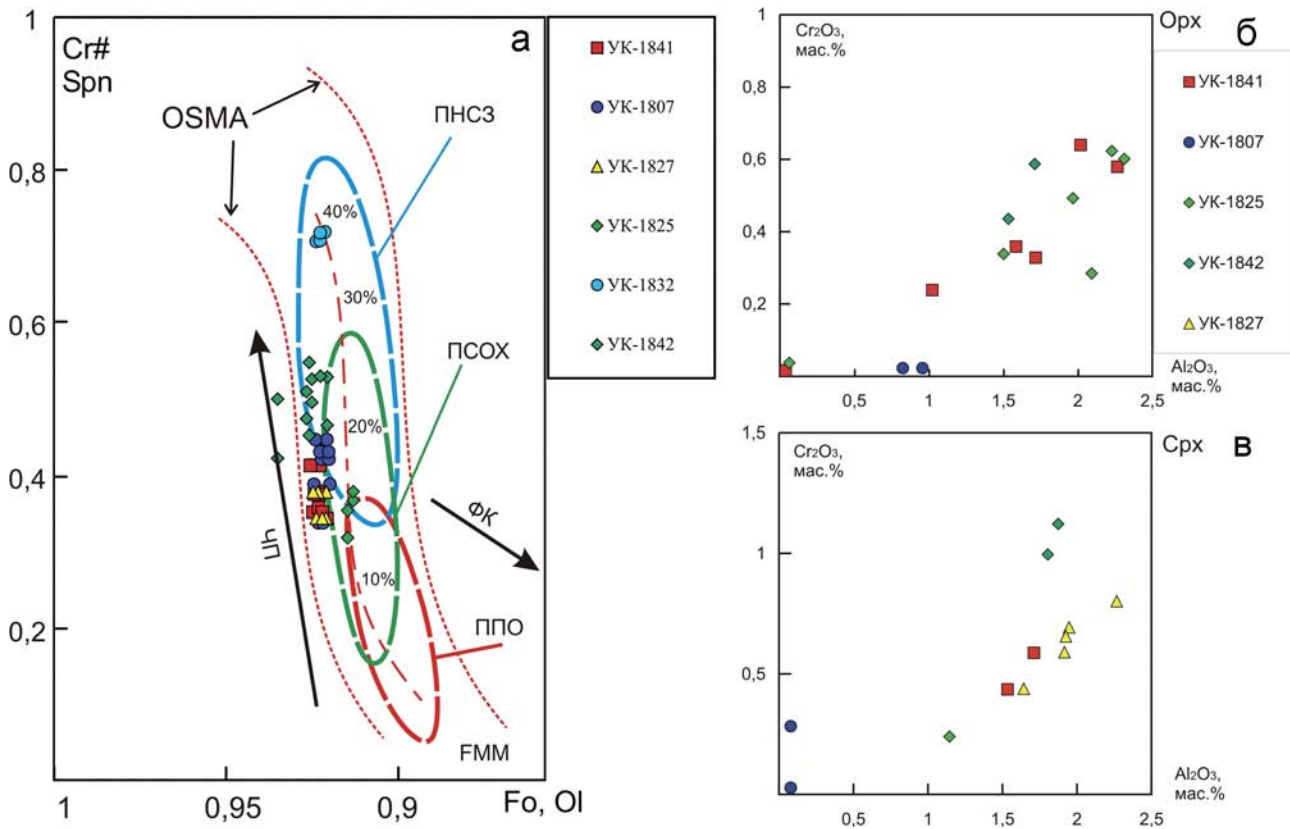


Рис. 10. Вариации состава оливина, хромшпинелидов и пироксенов в перидотитах и дунитах массива Узьянский Крака

Примечание: FMM — состав исходного (фертильного) мантийного вещества; OSMA — границы поля составов хромшпинелидов мантийных ультрамафитов; ПСОХ — поле составов перидотитов срединно-океанических хребтов; ПНСЗ — поле составов океанических надсубдукционных перидотитов; ППО — перидотиты пассивных окраин; ФК — направление эволюции составов, связанной с фракционной кристаллизацией; ЧП — направление эволюции составов, связанное с частичным плавлением (показаны поля составов реститов от 10–20–40% степеней плавления); поля и тренды проведены по данным работ [Johnson, 2012; Arai, 1994; Dick, Bullen, 1984; Jacques, Green, 1980; Pearce et al., 2000].

Fig. 10. Compositional variations of olivine, chromian spinel and pyroxenes in the peridotites and dunites of Uzyansky Kraka massif

Note: FMM — fertile mantle matter; OSMA — olivine-spinel mantle array; ПСОХ — field of peridotites of Mid-Oceanic Ridges; ПНСЗ — field of oceanic supra-subduction zones peridotites; ППО — field of passive margin peridotites; ФК — trend of fractional crystallization; ЧП — trend of partial melting (compositional fields are according with 10–20–40% melting); after works [Johnson, 2012; Arai, 1994; Dick, Bullen, 1984; Jacques, Green, 1980; Pearce et al., 2000].

в однозначной интерпретации составов сосуществующих оливинов и хромшпинелидов, как результата частичного плавления. Во многих работах последних лет появление высокохромистых шпинелидов в дунитах стали связывать непременно с участием взаимодействия «расплав – мантия», происходящего в надсубдукционной обстановке [Kelemen et al., 1995; Melcher et al., 1997; Zhou et al., 1994 и др.]. Вместе с тем доказательства участия реакционных процессов в подавляющем большинстве случаев не приводятся. Кроме того, сравнивать составы шпинелидов в перидотитах SSZ либо бонинитах с таковыми в офиолитовых дунитах некорректно хотя бы потому, что это совершенно

разные породы. Как показывает структурное изучение дунитов массивов Крака [Савельев и др., 2016], их образование непосредственно связано с процессами высокотемпературного пластического течения, а не только с частичным плавлением.

На рис. 10б, в приведены диаграммы, иллюстрирующие четкую прямую зависимость между содержаниями главных примесных элементов (Al и Cr) в ромбических и моноклинных пироксенах из перидотитов, что отмечалось ранее для ультрамафитов Южного и Среднего Крака [Савельев и др., 2017]. В большинстве образцов содержания хрома и алюминия значимые, с понижением в необластах по сравнению с крупными деформированными крис-

таллами. В перидотите УК-1807 концентрация этих элементов весьма низкая, что согласуется с составом оливина и хромшпинелида, и указывает на высокую степень деплетирования данного образца.

Выводы

Изученный массив почти полностью сложен породами ряда «лерцолит – гарцбургит – дунит» и по составу сходен с типичными мантийными разрезами офиолитовых ассоциаций. Основными породообразующими минералами являются высокомагнезиальный оливин, ромбические и моноклинные пироксены с низким содержанием железа. Все породообразующие минералы изученных ультрамафитов обнаруживают признаки пластической деформации, выраженные в разориентировке блоков первично единых кристаллов, в изгибе элементов строения кристаллов (трещины спайности и др.), в образовании кинк-бандов. Составы сосуществующих хромшпинелидов и оливинов и геохимические особенности пород свидетельствуют о том, что изученные перидотиты вероятнее всего являются реститами от умеренных степеней частичного плавления мантийного источника (15–20%). При последующей реоморфической трансформации произошло образование дунитов с хромитовой минерализацией на участках локализации пластического течения.

Исследования проведены в рамках Госзадания Минобрнауки РФ (темы №№ 0252-2017-0014, 0246-2019-0078). Электронно-микроскопические исследования минералов ультрамафитов проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Список литературы:

- Русин И.А. Гранатсодержащие парагенезисы в гипербазитах массива Крака (Южный Урал) // Ежегодник–2001. – Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2002. – С. 134–137.
- Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Блинов И.А., Кожевников Д.А., Котляров В.А. Петрологические свидетельства синдеформационной сегрегации вещества при образовании дунитов (на примере офиолитов Крака, Южный Урал) // Минералогия. – 2016. – № 4. – С. 56–77.
- Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Сергеев С.Н., Мусабиров И.И. О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перидотитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования // Докл. РАН. – 2017. – Т. 276, № 2. – С. 200–204. – DOI: 10.7868/S0869565217260176.
- Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. Геология, петрогеохимия и хромитонность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 320 с.

Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. – М.: Наука, 1987. – 230 с.

Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Шапова Ю.В. Кристаллохимия хромшпинели и окситермобарометрия ультрамафитов складчатых областей. – Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2007. – 310 с.

Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*. – 1994. – V. 113. – P. 191–204. – doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3.

Dick H.J., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1984. – V. 86. – P. 54–76. – doi.org/10.1007/bf00373711.

Jacques J.L., Green D.H. Anhydrous melting of peridotites at 0–15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1980. – V. 73. – P. 287–310. – doi.org/10.1007/bf00381447.

Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Ph.D. thesis. – Cardiff University, 2012. – 468 p.

Kelemen P.B., Shimizu N., Salters V.J.M. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels // *Nature*. – 1995. – V. 375. – P. 747–753. – doi.org/10.1038/375747a0.

Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpfl E.F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite // *Journal of Petrology*. – 1997. – V. 38. – P. 1419–1458. – doi.org/10.1093/petrology/38.10.1419.

Pearce J., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J., Leat P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. – 2000. – V. 139. – P. 36–53. – doi.org/10.1007/s004100050572.

Zhou M.F., Robinson P.T., Bai W.J. Formation of podiform chromites by melt/rock interaction in the upper mantle / *Mineralium Deposita*. – 1994. – V. 29. – P. 98–101. – doi.org/10.1007/bf03326400.

References:

Arai S. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation // *Chemical Geology*. 1994. V. 113. P. 191–204. doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3.

Chashchukhin I.S., Votyakov S.L., Shchapova Yu.V. Kristallokhiimiya khromshpineli i oksi-termobarometriya ultramafitov skladchatykh oblastey [Crystal chemistry of chrome spinel and oxithermobarometry of ultramafites of fold belts]. Yekaterinburg: IG&G UrB RAS, 2007. 310 p. (in Russian).

Dick H.J., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1984. V. 86. P. 54–76. doi.org/10.1007/bf00373711.

Jacques, J.L., Green D.H. Anhydrous melting of peridotites at 0–15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1980. V. 73. P. 287–310. doi.org/10.1007/bf00381447.

Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Ph. D. thesis. Cardiff University, 2012. 468 p.

Kelemen P.B., Shimizu N., Salters V.J.M. Extraction of mid-ocean-ridge basalt from the upwelling mantle by focused flow of melt in dunite channels // *Nature*. 1995. V. 375. P. 747–753. doi.org/10.1038/375747a0.

Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpfl E.F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite // *Journal of Petrology*. 1997. V. 38. P. 1419–1458. doi.org/10.1093/petrology/38.10.1419.

Pearce J., Barker P.F., Edwards S.J., Parkinson I.J., Leat P.T. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139. P. 36–53. doi.org/10.1007/s004100050572.

Rusin I.A. Granat-soderzhatchie assotsiatsii v giperbasitakh massiva Kraka (Yuzhny Ural) [Garnet-bearing assemblages in the gyperbasites of Kraka massif (the Southern Urals)] // *Ezhegodnik—2001*. Ekaterinburg: IGG UrB RAS, 2002. P. 134–137 (in Russian).

Saveliev D.E., Belogub E.V., Blinov I.A., Kozhevnikov D.A., Kotlyarov V.A. Petrologicheskie svidetel'stva sindeformatsionnoy

segregatsii vetchestva pri obrazovanii dunitov [Petrological evidences of syndeformation segregation of matter during a dunite formation (on the example Kraka ophiolites, the Southern Urals)] // *Mineralogiya* [Mineralogy]. 2016. V. 4. P. 56–77 (in Russian).

Saveliev D.E., Puchkov V.N., Sergeev S.N., Musabirov I.I. Deformation-induced decomposition of enstatite in mantle peridotite and its role in partial melting and chromite ore formation // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 476, No. 1. P. 1058–1061. DOI: 10.1134/S1028334X17090161.

Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A. Geologiya, petrogeokhimiya i khromitonasnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala. [Geology, petrogeochemistry, and chromite content of gabbro-hyperbasic massifs of the South Urals]. Ufa: DizaynPoligrafServis, 2008. 320 p. (in Russian).

Savelieva G.N. Gabbro-ultrabazitovyye komplekсы ofiolitov Urala i ikh analogi v sovremennoy okeanicheskoy kore [Gabbro-ultrabasic complexes of the Urals ophiolites and their analogues in the present-day oceanic crust]. Moscow: Nauka, 1987. 230 p. (in Russian).

Zhou M.F., Robinson P.T., Bai W.J. Formation of podiform chromites by melt/rock interaction in the upper mantle // *Mineralium Deposita*. 1994. V. 29. P. 98–101. doi.org/10.1007/bf03326400.

Сведения об авторах:

Савельев Дмитрий Евгеньевич, доктор геол.-мин. наук, профессор АНРБ, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: savl71@mail.ru

Нугуманова Язгуль Наилевна, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

Гатауллин Руслан Азатович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: RusRusu4@yandex.ru

Сергеев Семен Николаевич, Федеральное бюджетное учреждение науки Институт проблем сверхпластичности металлов РАН (ИПСМ РАН), г. Уфа. E-mail: semen@imsp.ru

About the author:

Saveliev Dmitry Evgenievich, doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: savl71@mail.ru

Nugumanova Yazgul Nailevna, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: jazgul-ice@yandex.ru

Gataullin Ruslan Azatovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: RusRusu4@yandex.ru

Sergeev Semen Nikolaevich, Institute for Metals Superplasticity Problems RAS (IMSP RAS), Ufa. E-mail: semen@imsp.ru