УДК 552.321.6:553.08

КАЛНИНСКИЙ УЛЬТРАМАФИТОВЫЙ МАССИВ ЗАПАДНОГО САЯНА: РУДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И ЕЕ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ПРИРОДА

Юричев Алексей Николаевич,
канд. геол.-минерал. наук, доцент каф. петрографии
геолого-географического факультета Национального
исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36. E-mail: juratur@sibmail.com

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального петрологического исследования ультрабазитовых массивов Амыльского хромитоносного района Западного Саяна с позиции их потенциальной рудоносности на хромитовое оруденение и сопутствующую благороднометальную минерализацию.

Цель работы: *характеристика рудной минерализации в ультрамафитах Калнинского массива для реконструкции эволюции вещественного состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов в процессе формирования пород массива и их последующих метаморфических изменений.*

Методы исследования: *характеристика рудной минерализации в прозрачных шлифах и аншлифах на поляризационном микроскопе AxioScope Carl Zeiss; оценка химического состава хромшпинелидов и сульфидов на электронном сканирующем микроскопе Tescan Vega II LMU, оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700; содержание золота и ЭПГ в хромитах на квадрупольном ICP MS – спектрометре серии Agilent 7500.*

Результаты. *Исследованы особенности рудной минерализации Калнинского ультрамафитового массива; показан типоморфизм и химический состав минералов. Полученные данные позволили установить степень частичного плавления исходного субстрата и температуру его метаморфического преобразования при перемещении и консолидации в земной коре. Удалось проследить эволюционную направленность изменения химического состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов, которая определяется условиями их деплетирования в верхней мантии и последующими метаморфогенными преобразованиями. По своему химическому составу хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (28...41 %), который испытал пластические метаморфические преобразования при температурах от 844 до 746 °С, и соответствуют хромшпинелидам из ультрамафитов глубоководных желобов. Сульфидная минерализация, представленная рассеянной вкрапленностью хизлевудита, образовалась в условиях низкотемпературного гидротермального процесса, который способствовал перераспределению высвобождающегося из оливина и ортопироксена никеля и обособлению его в виде самостоятельных минеральных фаз.*

Ключевые слова:
Реститы, дуниты, гарцбургиты, хромититы, хромшпинелиды, сульфиды, генезис.

Введение

Массивы ультрабазитов вызывают интерес геологов как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности. Ультраосновные породы являются источником многих рудных и нерудных полезных ископаемых – Au, ЭПГ, Ni, Cu, Cr, асбеста, драгоценных и поделочных камней. В связи с острым дефицитом легирующих добавок для черной металлургии в России в последние годы также резко возрос интерес к изучению ультрамафитовых массивов как единственного источника хрома.

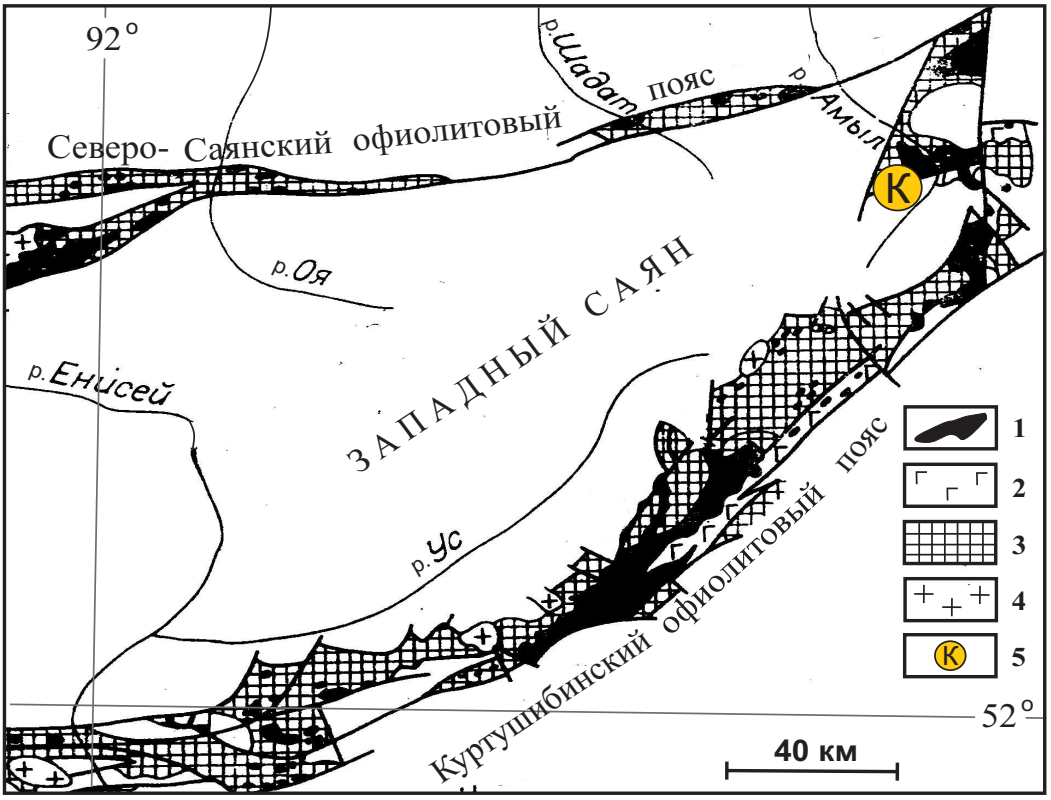
Проявления хромовых руд в пределах Красноярского края известны на Енисейском кряже и Западном Саяне. Наиболее перспективным на данный вид сырья признан Амыльский хромитоносный район Западного Саяна [1], в пределах которого располагается один из потенциально перспективных на хромитовое оруденение Калнинский массив [2, 3], являющийся объектом настоящего исследования.

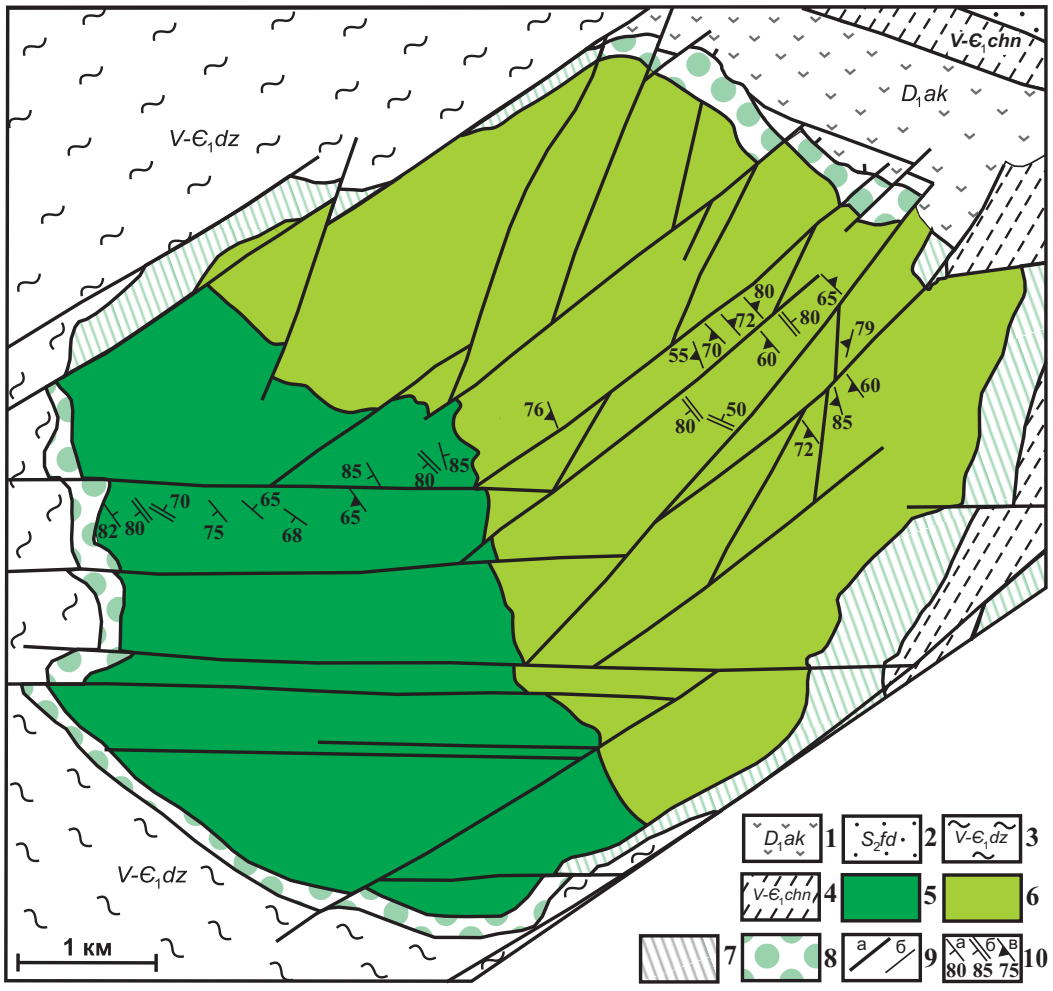
В статье рассматривается эволюция вещественного состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов в процессе формирования пород и их последующих метаморфических изменений.

Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Калнинский ультрамафитовый массив находится в северо-восточной части Западного Саяна в междуречье нижнего течения рр. Кална и Бесь, левых притоков р. Амыл (рис. 1), в геологическом отношении – относится к иджимскому комплексу и, очевидно, является фрагментом нижней части Куртушибинского офиолитового пояса [4]. В плане он имеет субизометричную форму, его площадь составляет примерно 35 км^2. Массив является тектоническим блоком, окаймленным серпентинитовым меланжем, и сложен метаморфическими перидотитами, которые представляют собой реститовые породы дунит-гарцбургитового полосчатого комплекса [2, 3].

Северо-восточная часть массива сложена главным образом дунитами; в юго-западной части – дунит-гарцбургитовым полосчатым комплексом. Дуниты и гарцбургиты имеют довольно свежий облик, а в тектонически ослабленных зонах обычно преобразованы в серпентиниты. Среди дунитов северо-восточной части массива встречаются линейные тела полосчатых хромититов. Также среди ультрамафитов устанавливаются дайкообразные тела ортопироксенитов, клинопироксенитов и мелкозернистых габбро.


92°
Северо- Саянский офиолитовый пояс
р.Шадат
р.Амыл
р.Оя
ЗАПАДНЫЙ САЯН
р.Енисей
р.Ус
Куртушибинский офиолитовый пояс
52°
40 км
1
2
3
4
5
К


V-Є1chn
D1ak
V-Є1dz
V-Є1dz
1 км
D1ak 1
S2fd 2
V-Є1dz 3
V-Є1chn 4
5
6
7
8
а б 9
а б в 10

Дуниты и гарцбургиты обычно характеризуются средне-, крупнозернистыми структурами, нередко – грубозернистыми, и в различной степени подвержены пластическим деформациям, что выражается в появлении неоднородного погасания минералов, полос пластического излома и порфирокластезе, обусловленном синтектонической рекристаллизацией [5].

Методика исследования

Рудные минералы в породах Калнинского массива изучались в проходящем и отраженном свете на поляризационном микроскопе Axioscop 40 Pol. Анализ их вещественного состава выполнен методом рентгеноспектрального микроанализа [7] на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск). Для этого из отобранных образцов пород с рудной минерализацией были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 3...4 мм по рекомендуемым методикам [7]. Перед проведением анализов на исследуемые поверхности предварительно напыляли слой углерода толщиной 25...30 нм. Последующие расчеты химических составов проводились по программе INCA-Issue 18b и по дополнительным авторским программам.

Выявление содержаний золота и платиноидов в хромитах также выполнено в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ на квадрупольном ICP MS-спектрометре серии Agilent 7500. Для анализа предварительно подготавливались порошки путем истирания отобранных зерен хромита.

Рудная минерализация

Хромшпинелиды являются основными рудными минералами в породах Калнинского массива. В гарцбургитах они встречаются редко в виде единичных зерен и небольших скоплений размером до 0,5...1 мм, иногда до 2 мм. Зерна имеют как ксеноморфную, так и эвгедральную, субизометричную форму и окрашены в красно-бурый цвет. Удлиненные индивиды вытягиваются согласно директивности породы.

Выявленные рудопроявления хромшпинелидов Калнинского массива приурочены в большинстве случаев к трещинам в дунитах, в связи с чем данные породы представляют наибольший металлогенический интерес. На желтых корочках выветривания в дунитах постоянно отмечается заметная акцессорная вкрапленность хромшпинелидов (до 5 %, в рудных зонах их содержание возрастает), которые обычно представлены субизометричными и эвгедральными зернами, часто удлиненными эллипсоидальными с размерами около 0,5 мм, редко – до 1,5...2 мм (рис. 2, 3). Зерна окрашены в вишнево-бурый, красно-бурый или темно-бурый цвета, а по трещинкам и периферии – в черный, вследствие их замещения непросвечивающим хроммагнетитом и магнетитом.

Нередко зерна хромшпинелидов обособляются в цепочки, струйки, жилки, которые ориентируются в северо-западном направлении, согласно внутренней полосчатой структуре массива (рис. 2, *б*).

Рис. 1. *Расположение Калнинского ультрамафитового массива в региональных структурах Западного Саяна [6] и схема его геологического строения (составлена по фондовым материалам А.Д. Заболотского, С.Г. Катанова, полевым наблюдениям А.И. Чернышова с дополнениями автора). Для верхнего изображения: 1 – ультрамафиты; 2 – габброиды, комплекс параллельных даек; 3 – спилит-диабазовая формация, углисто-кремнистые сланцы (чингинская свита); 4 – посторогенные граниты нижне-среднедевонского возраста; 5 – Калнинский ультрамафитовый массив. Для нижней схемы: 1 – нижнедевонская актургская свита: андезиты, трахиандезиты, лаво- и пирокластиты, реже трахиандезибазальты, андезибазальты, базальты; 2 – верхнесилурийская федоровская свита: разнозернистые песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты, аргиллиты; 3 – венд-нижнекембрийская джебашская серия: метабазальты, метаморфические сланцы кварцевые, серицит-альбит-кварцевые, хлорит-альбит-кварц-карбонатные, серицит-хлорит-кварц-альбитовые, прослои и линзы мраморов, кальцифиров; 4 – венд-нижнекембрийская чингинская свита: базальты, трахибазальты, глинисто-кремнистые, углеродисто-глинисто-кремнистые, хлорит-кремнистые сланцы, микрокварциты, прослои и линзы метаалевролитов, метапесчаников, метагравелитов, метаконгломератов; 5–7 – венд-нижнекембрийский Калнинский ультрамафитовый массив: 5 – дунит-гарцбургитовый полосчатый комплекс, 6 – дуниты, 7 – серпентинизированные ультрамафиты нерасчлененные; 8 – серпентиновый меланж; 9 – а) разрывные нарушения, разломы; б) геологические границы; 10 – элементы залегания: а) полосчатости в гарцбургитах, б) минеральной уплощенности, в) хромитовых жилок*

Fig. 1. *Position of Kalninsky ultramafic massif in regional structures of Western Sayan [6] and diagram of its geological structure (plotted by the materials of A.D. Zabolotsky, S.G. Katanov, on field observations of A.I. Chernyshov with the author's supplements). For the upper image: 1 – ultramafites; 2 – gabbroids, complex of parallel dikes; 3 – spilite-diabasic formation, carbon-bearing siliceous shales (chinginskaya strata); 4 – postorogenic granites of Lower-Middle Devonian Age; 5 – Kalninsky ultramafic massif. For the lower image: 1 – Lower-Devonian akturugskaya strata: andesites, trachyandesites, lava- and pyroclastites, more rarely trachy-andesite-basalts, andesite-basalts, basalts; 2 – Upper-Silurian fedorovskaya strata: consertal sandstones, gravelstones, glomerations, siltstones, mudstones; 3 – Vendian Lower Cambrian dzhebashskaya series: metabasalts, metamorphous quartz shales, sericite-albite-quartz, chlorite-albite-quartz-carbonate, sericite-chlorite-quartz-albite, marble and calciphyre beds and lenses; 4 – Vendian Lower Cambrian chinginskaya strata: basalts, trachy basalts, argillaceous-siliceous, carbon-argillaceous-siliceous, chlorite-siliceous shales, micro-quartz rocks, beds and lenses of meta-siltstones, meta-consertal sandstones, meta-gravelstones, meta- glomerations; 5–7 – Vendian Lower Cambrian Kalninsky ultramafic massif: 5 – dunite-harzburgite banded complex, 6 – dunites, 7 – serpentized undivided ultramafites; 8 – serpentine melange; 9 – a) faults, splits; б) geological boundaries; 10 – attitudes: a) banding in harzburgites, б) miniral flatness, в) chromite veins*

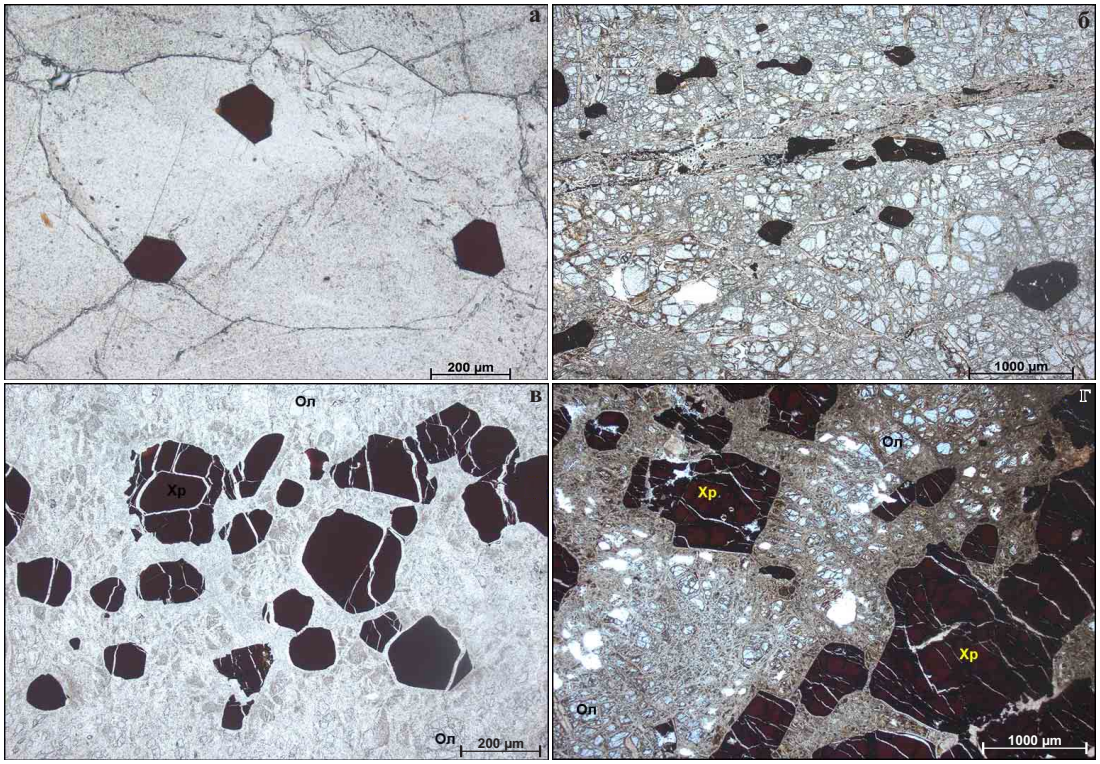


Рис. 2. *Хромшпинелиевая минерализация в дунитах Калнинского массива: а) акцессорные зерна хромшпинелидов эвгедральной формы, обр. С-38–306,5; б) акцессорная вкрапленность удлиненных зерен хромшпинелидов, ориентированных субпараллельно согласно трещинкам кливажа и подчеркивающих директивность породы, обр. 7007; в) хромитовая жилка, обр. С-36–271; г) хромитовая густовкрапленная жилка с полосчатой текстурой, обр. 7045/2. Фотографии выполнены в прозрачных шлифах при одном николе. Хр – хромшпинелиды, Ол – серпентинизированный оливин*

Fig. 2. *Chrome-spinel mineralization in dunites of Kalninsky massif: a) accessory flakes of chromospinelides of euhedral shape, sample C-38–306,5; б) accessory shot of elongated grains of chromospinelides subparallel oriented according to cleavage cracks and pointing out rock directional structure, form. 7007; в) chromite vein, form. C-36–271; г) chromite thick-embedded vein with banded structure, form. 7045/2. The photos were taken in transparent sections at one nycol. Xp – chromospinelides, Ол – serpentized olivine*

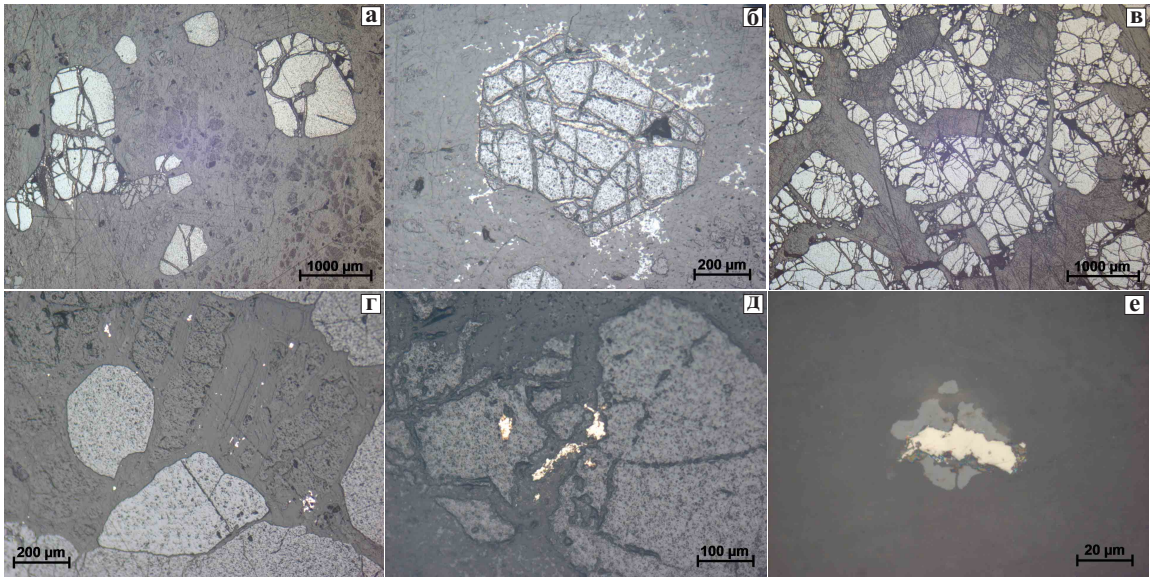


Рис. 3. *Хромшпинелиевая и сульфидная минерализации в ультрамафитах Калнинского массива (аншлифы): а, б) акцессорные зерна хромшпинелидов эвгедральной формы; в) густовкрапленные хромиты; г) мелкая сульфидная «сыпь» в интерстициях между зернами хромшпинелидов; д) агрегативные включения хизлевудита в зернах хромшпинелидов; е) самостоятельное зерно хизлевудита в магнетитовой «рубашке»*

Fig. 3. *Chrome-spinel and sulfide mineralization in ultramafites of Kalninsky massif (polished sections): a, б) accessory flakes of chromospinelides of euhedral shape; в) thick-embedded chromites; г) thin sulfide «fines» in interstices between chromospinelide grains; д) aggregative particles of Heazlewoodite in chromospinelide grains; e) Heazlewoodite magnetite «jacked» sovereign grain*

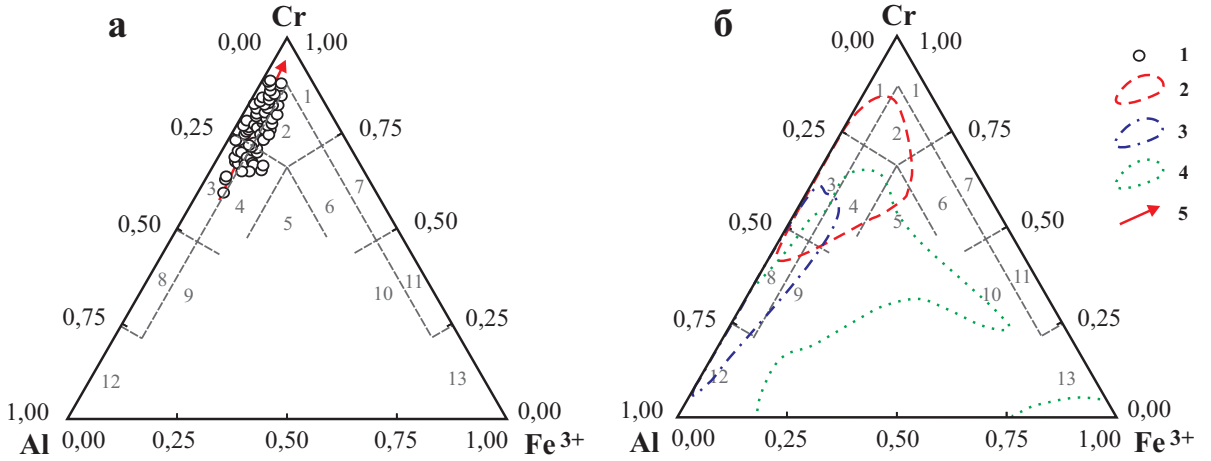


Рис. 4. *Составы хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива (а), а также поля составов шпинелидов из ультрамафитов различных геодинамических обстановок (б) [9] на классификационной диаграмме Н.В. Павлова [8]: 1) хромиты; 2) субферрихромиты; 3) алюмохромиты; 4) субферриалюмохромиты; 5) ферриалюмохромиты; 6) субалюмоферрихромиты; 7) феррихромиты; 8) хромпикотиты; 9) субферрихромпикотиты; 10) субалюмохроммагнетиты; 11) хроммагнетиты; 12) пикотиты; 13) магнетиты. Условные обозначения: 1 – ультрамафиты Калнинского массива; 2 – ксенолиты ультрамафитов из базальтов; 3 – ультрамафиты срединно-океанических хребтов (СОХ); 4 – ультрамафиты глубоководных желобов (ГЖ); 5 – тренд, отражающий увеличение степени рестирования ультрамафитов*

Fig. 4. *Composition of chromospinelides from Kalninsky massif (a), fields of compositions of spinelides from ultramafites of different geodynamic conditions (б) [9] on classification diagram by N.V. Pavlov [8]: 1) chromites; 2) sub-ferri-chromites; 3) chromohercynites; 4) sub-ferri-chromohercynites; 5) ferri-chromohercynites; 6) sub-alumina-ferri-chromites; 7) ferri-chromites; 8) chrompicotites; 9) sub-ferri-chrompicotites; 10) sub-alumina-chrome-magnetites; 11) chrome-magnetites; 12) picotites; 13) magnetites. Symbols: 1 – ultramafites of Kalninsky massif; 2 – xenolites of ultramafites from basalts; 3 – ultramafites of mid-ocean ridges (MOR); 4 – ultramafites of deep-sea trenches (DST); 5 – trend reflecting the increase of ultramafite restitic degree*

Мелкие жилки хромшпинелидов в дунитах имеют вкрапленную структуру (рис. 2, *в*). Содержание зерен хромшпинелидов в них составляет до 60...70 %, промежутки между которыми выполнены лизардитом с петельчатой структурой. Зерна здесь имеют субизометричную и неправильную форму. Часто они образуют «сросшиеся» агрегаты, в которых отчетливо различаются границы отдельных индивидов размером 1...2,5 мм.

В дунитах в зонах оруденения количество хромшпинелидов существенно возрастает и значительно варьирует от 10 до 50...70 %, с образованием от убого вкрапленных до густо вкрапленных руд (рис. 3, *в*). Зоны оруденения имеют линейное северо-западное простирание, их мощность, как правило, не превышает 10...15 м. Для них характерно полосчатое строение, обусловленное различной концентрацией хромшпинелидов в дунитовом субстрате (рис. 2, *г*). Ширина отдельных полосок обычно менее 10 см, нередко внутри них отмечается согласное директивное расположение как отдельных зерен хромшпинелидов, так и их агрегатов. Полосчатость в рудных зонах ориентирована согласно внутренней структуре массива.

Проведенные исследования показывают, что все проанализированные хромшпинелиды характеризуются высокохромистым составом (Cr_2O_3=51,17...63,94 %) и в целом очень слабо метаморфизованы. В химическом составе постоянно отмечаются NiO (до 0,29 %), CoO (до 0,15 %), ZnO (до 0,35 %) и V_2O_5 (до 0,27 %).

В соответствии с классификацией Н.В. Павлова [8], в породах Калнинского массива большая часть шпинелидов по химическому составу соответствует хромитам, в значительно меньшем количестве отмечаются алюмохромиты, субферриалюмохромиты и субферрихромиты (рис. 4, *а*). При этом алюмохромиты и субферриалюмохромиты, очевидно, являются более ранними (из умеренно деплетированных более глубинных разностей пород) разновидностями хромшпинелидов по отношению к хромитам и субферрихромитам о чем свидетельствуют их более высокие значения глиноземистости и магнезиальности при более низкой хромистости. Для них характерны также относительно повышенные содержания TiO_2 и ZnO (табл. 1).

На рис. 4, 5 фигуративные точки составов хромшпинелидов образуют линейно вытянутый рой точек, через который можно провести эволюционный тренд, отражающий преобразование вещественного состава хромшпинелей в мантийных условиях, а также, очевидно, степень рестирования вмещающих их ультрамафитов. Увеличение степени рестирования сопровождается резким возрастанием хромистости при сохраняющемся либо несколько возрастающем значении железистости и уменьшении глиноземистости и магнезиальности (рис. 5). Такая особенность характерна для мантийных реститогенных ультрамафитов [10–13] и служит дополнительным свидетельством реститовой природы пород Калнинского массива.

Таблица 1. *Средние составы хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива, мас. %*

Table 1. *Average composition of chromospinelides from ultramafites of Kalninsky massif, wt. %*

Хромшпинелид Chromospinelide	N	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	V_2O_3	FeO	Fe_2O_3	MnO	MgO	NiO	ZnO	CoO	Сумма Total
Хромит Chromite	326	0,12	8,35	59,88	0,15	17,29	3,19	0,31	10,22	0,07	0,09	0,07	99,81
Субферрихромит Sub-ferri-chromite	12	0,13	8,99	55,44	0,18	19,10	6,08	0,34	9,27	0,10	0,07	0,07	100,03
Алюмохромит Alumina-chromite	29	0,18	13,72	53,72	0,17	17,63	3,51	0,29	10,66	0,06	0,11	0,06	100,17
Субферриалюмохромит Sub-ferri-alumina-chromite	7	0,16	13,10	52,27	0,17	17,56	5,57	0,34	10,54	0,09	0,10	0,07	100,01

Примечание. Здесь и далее определение химического состава осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU», оборудованном энергодисперсионным спектрометром (с детектором Si (Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700 в ЦКП «Аналитический центр геохимии природных систем» ТГУ (г. Томск), оператор А.С. Кульков.

Note. Hereinafter chemical composition was determined on electron scanning microscope «Tescan Vega II LMU» equipped with energy-dispersive spectrometer (with detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at TPU «Analytic center of natural system geochemistry» (Tomsk), the operator is A.S. Kulkov.

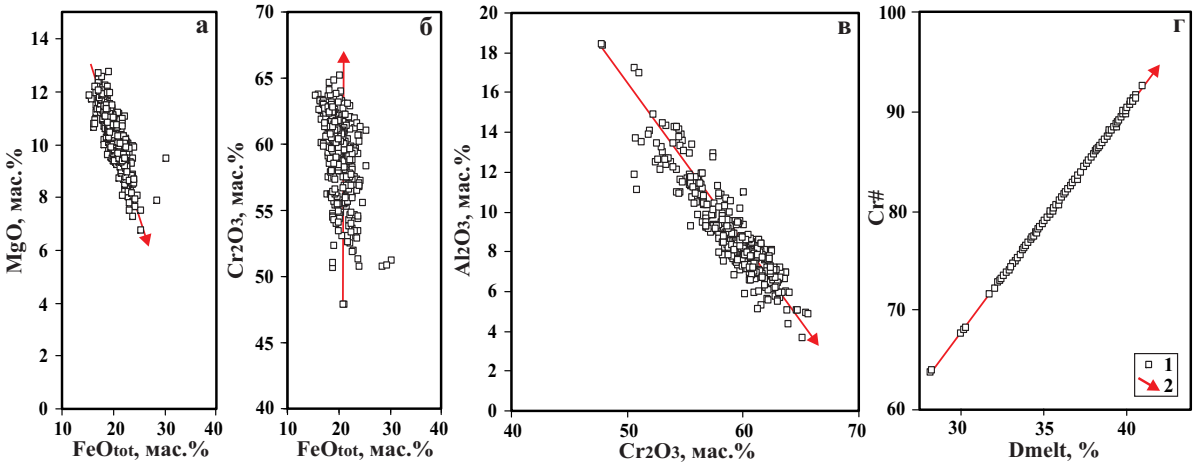


Рис. 5. *Бинарные диаграммы (а–в) для хромшпинелидов из ультрамафитов Калнинского массива: 1) исследуемые хромшпинелиды; 2) эволюционный тренд составов хромшпинелидов, отражающий степень рестирования вмещающих его ультрамафитов. График (г) отражает зависимость значений параметра Cr# хромшпинелидов от степени частичного плавления лерцолита Dmelt (по экспериментальным данным [14]): Cr#=[Cr/(Cr+Al)]·100 %; Dmelt=0,426·Cr#+1,538*

Fig. 5. *Binary diagrams (а–в) for chromospinelides from ultramafites of Kalninsky massif: 1) the chromospinelides under study; 2) evolution trend of composition of chromospinelides reflecting the restitic degree of ultramafites enclosing it. The diagram (г) reflects the dependence of the values of Cr# parameter of chromospinelides on the degree of Dmelt lherzolite partial melting (by the experimental data [14]): Cr#=[Cr/(Cr+Al)]·100 %; Dmelt=0,426·Cr#+1,538*

Оценка химического состава хромшпинелидов с использованием экспериментальных данных [14] позволила определить степень частичного плавления мантийного субстрата при формировании ультрамафитов Калнинского массива. Согласно расчетам и графическим построениям (рис. 5, *г*), данные породы формировались при значительной вариации степени частичного плавления мантийного источника – 28...41 %. С использованием оливин-хромшпинелиевого геотермометра Дж. Фабри [15] определены температуры формирования пород, которые составляют от 844 до 746 °С (табл. 2).

Методом ICP-MS анализа в густо вкрапленных хромитах Калнинского массива выявлены следующие содержания платиноидов: Pt=0,021...0,059, Ru=0,016...0,078, Pd=0,008...0,019 г/т. Полученные значения позволяют предполагать платинорутениевую специализацию минералов платиновой группы (ЭПГ) в изученных рудах. Золото, при пороге чувствительности 0,01 г/т, в хромитах не обнаружено.

Сульфидная минерализация редка, отмечается в виде мелких агрегативных включений неправильной формы, заполняющих трещинки в зернах хромшпинелидов, а также преимущественно в виде рассеянной вкрапленности самостоятельных мелких зерен размером до 0,05 мм в интерстициях между индивидами хромшпинелидов (рис. 3, *г–е*). По химическому составу выявленные сульфиды

близки между собой и соответствуют хизлевудиту, но отличаются от его стехиометрического состава несколько пониженным содержанием никеля при незначительном повышении содержаний серы. В химическом составе минерала постоянно отмечается незначительная примесь железа (табл. 3).

Таблица 2. *Температурные равновесия, рассчитанные по оливин-хромшпинелидовому геотермометру Дж. Фабри [15] для ультрамафитов Калнинского массива*

Table 2. *Temperature balance calculated by olivine-chromospinelide geothermometer of J. Fabry [15] for ultramafites of Kalninsky massif*

Порода Rock	Образец Sample	Оливин Olivine		Хромшпинелид Chromospinelide				T, °C
		MgO	FeO	Cr_2O_3	Al_2O_3	FeO	MgO	
Дунит Dunite	7036/1	49,61	9,10	60,20	7,48	23,00	8,14	792
	7052	49,63	9,06	56,07	10,78	23,20	8,47	768
	7081	50,81	7,51	54,02	14,83	18,82	11,21	789
	7045/1	51,04	7,35	61,72	7,42	19,25	10,52	844
	7074	49,99	8,30	58,92	10,49	19,16	10,35	830
	7007	49,28	9,47	34,92	27,74	23,17	11,95	746
	7017	48,86	9,96	33,49	30,68	21,68	12,77	766
Гарцбургит Harzburgite	7073	49,86	8,60	58,35	10,73	20,69	8,77	762
	7084	50,31	8,29	52,96	16,64	18,11	11,10	785

Таблица 3. *Химический состав хизлевудита из ультрамафитов Калнинского массива, мас. %*

Table 3. *Chemical composition of heazlewoodite from ultramafites of Kalninsky massif, wt. %*

Образец Sample	Ni	Co	Fe	Cr	S	Сумма Total
С-37-733_4	71,73	–	1,33	–	26,03	99,09
С-37-733_5	70,43	–	1,41	–	26,91	98,75
С-37-733_1	70,36	–	0,99	–	28,64	99,99
С-37-733_2	71,43	–	1,09	–	27,47	99,99
С-36-271_1	70,39	0,38	0,74	1,38	27,11	100
С-36-271_2	71,09	–	0,45	0,9	27,56	100
С-36-271_3	70,4	–	0,9	1,71	26,99	100
С-36-271_4	71,69	–	0,54	0,75	27,03	100,01
С-36-271_5	69,66	–	0,72	1,02	27,91	99,31
С-36-271_1	70,25	0,55	0,97	1,03	27,2	100
Среднее/Average	70,74		0,91	1,13	27,28	99,71

Обсуждение результатов и выводы

Впервые в данной работе предпринята попытка охарактеризовать как хромшпинелиевую, так и сульфидную минерализации, отмеченные в породах Калнинского ультрамафитового массива. При этом помимо типоморфизма и особенностей химического состава показано взаимоотношение между двумя этими группами рудных минералов.

Полученные результаты позволяют предположить, что в Калнинском массиве хромшпинелиевое оруденение представлено преимущественно вкрапленными рудами с широкими вариациями содержаний хромшпинелидов, которые обнаруживают единый линейный эволюционный тренд составов. Он отражает изменение составов хромшпинелидов в мантийных условиях [16–18] и, очевидно, обусловлен степенью рестирования вмещающих ультрамафитов. На подобные изменения состава хромшпинелидов обращали внимание зарубежные исследователи при изучении ультрамафитов из офиолитовых комплексов [11].

Существенное преобладание хромитов над другими хромшпинелидами, очевидно, указывает на высокую интенсивность деплетирования исходного мантийного вещества. В общем, по химизму хромшпинелиды относятся к высокохромистым разностям и характеризуются платинорутениевой специализацией ЭПГ. Однако в данном ряду может добавиться также иридий или осмий, содержания которых в шпинелидах автором не оценивались.

По своему химическому составу хромшпинелиды отвечают минералам верхнемантийного субстрата с высокой степенью частичного плавления (28...41 %), который испытал пластические метаморфические преобразования при температурах от 844 до 746 °С, и соответствуют хромшпинелидам из ультрамафитов глубоководных желобов (рис. 4, *б*).

Формирование хромитового оруденения, по мнению автора, осуществлялось в дунитах в зонах интенсивного высокотемпературного пластического течения, вдоль полосчатости дунит-гарцбургитового субстрата массива. В процессе пластического течения происходила сегрегация хромшпинелидов в отдельные параллельные полосы, которая сопровождалась «выдавливанием» из них пластического оливина. В результате неравномерного «выдавливания» оливина сформировались хромитовые рудные образования от убого вкрапленных до густо вкрапленных. На последующих стадиях в локальных участках наибольших деформаций сформировались маломощные мономинеральные хромитовые жилки с массивной текстурой, из которых оливин был полностью удален.

Сульфидная минерализация, наблюдаемая в виде рассеянной вкрапленности мелких зерен в интерстициях между индивидами хромшпинелидов, а также и внутри них, представлена поздними (эпигенетическими) выделениями хизлевудита. Данный минерал, по предположению автора, образовался в условиях низкотемпературного гидротермального процесса, который способствовал перераспределению никеля, высвобождающегося из оливина и ортопироксена, и обособлению его в виде самостоятельных минеральных фаз. Данный вывод хорошо согласуется с наблюдениями А.Б. Макеева, который отнес хизлевудит, отмечаемый в ультрабазитах из офиолитовых комплексов, к акцессорным сульфидам второй генерации, возникновение которой происходило в процессе массовой α-лизардитизации ультраосновных пород при температуре 400–250 °С во время регрессивного регионального автометаморфизма ультрабазитов зеленосланцевой фации [12].

Таким образом, в реститовых ультрамафитах выявляется эволюционная направленность в изменении химического состава хромшпинелидов и ассоциирующих с ними сульфидов, которая определяется главным образом условиями их деплетирования в верхней мантии, а также последующими метаморфогенными преобразованиями в земной коре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы хромитоносности и платиноносности гипербазитов Верхнеамыльского района в Западном Саяне / А.П. Кривенко, М.Ю. Подлипский, А.И. Кубышев, С.Г. Катанов // Минеральные ресурсы Красноярского края. – Красноярск: КНИИГиМС, 2002. – С. 314–324.
2. Еханин Д.А. Геологическое строение и перспективы рудоносности Калнинского ультрабазитового массива // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 9. – С. 24–28.
3. Чернышов А.И., Юричев А.Н. Петроструктурная эволюция ультрамафитов Калнинского хромитоносного массива в Западном Саяне // Геотектоника. – 2013. – № 4. – С. 31–46.
4. Петрология и метаморфизм древних офиолитов (на примере Полярного Урала и Западного Саяна) / под ред. В.С. Соболева, Н.Л. Добрецова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 222 с.
5. Чернышов А.И. Ультрамафиты (пластическое течение, структурная и петроструктурная неоднородность). – Томск: Чародей, 2001. – 214 с.
6. Сибилев А.К. Петрология и асбестоносность офиолитов (на примере Иджимского массива в Западном Саяне). – Новосибирск: Наука, 1980. – 213 с.
7. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
8. Павлов Н.В. Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. – 1949. – Вып. 103. – № 3. – 91 с.
9. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks // Journal of petrology. – 2001. – V. 42. – № 12. – P. 2279–2302.
10. Юричев А.Н. Акцессорные шпинелиды из ультрамафитов: индикаторы условий формирования // Руды и металлы. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
11. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas // Contrib. Mineral. Petrol. – 1984. – V. 84. – P. 54–76.
12. Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
13. Перевозчиков Б.В. Особенности изучения хромитоносности альпинотипных гипербазитов. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 47 с.
14. Леснов Ф.П., Подлипский М.Ю. Геохимия акцессорных хромшпинелидов из пород Эргакского хромитоносного гипербазитового массива и условия его формирования (Западный Саян) // ДАН. – 2008. – Т. 422. – № 5. – С. 660–664.
15. Fabries J. Spinel-olivine Geotermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes // Contrib. Miner. and Petrol. – 1979. – V. 69. – № 4. – P. 329–336.
16. Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и акцессорной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. – 2007. – № 4. – С. 32–39.
17. Юричев А.Н., Чернышов А.И. Рудная минерализация идарского дунит-гарцбургитового комплекса (Северо-Запад Восточного Саяна) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 69–75.
18. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Кульков А.С. Рудная минерализация Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва) // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 130–136.

Поступила 12.08.2014 г.

UDC 552.321.6:553.08

KALNINSKY ULTRAMAFIC MASSIF OF WESTERN SAYAN: ORE MINERALIZATION AND ITS GENETIC NATURE

Alexey N. Yurichev,
Cand. Sc., National Research Tomsk State University, 36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: juratur@sibmail.com

Relevance of the work *is caused by the need of detailed petrological studies of ultrabasic massifs of Amylsky chromite-bearing area of the Western Sayan in terms of their potential for chromite ore and associated precious metal mineralization.*
The main aim of the study *is to characterize mineralization in Kalninsky ultramafic massif for reconstructing the evolution of the material composition of chromites and sulfides associating with them at massif rocks formation and their subsequent metamorphic changes.*
The methods used in the study: *characteristics of mineralization in transparent and polished sections on the polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; evaluation of chemical composition of chromospinelides and sulfides on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometer (detector Si (Li) Standard) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700; content of Au and PGE in chromites on quadrupole ICP MS – Agilent 7500 series spectrometer.*
The results. *The author has studied the features of ore mineralization of Kalninsky ultramafic massif. The paper introduces minerals tipomorfizm and chemical compound. The resulted data allowed determining the degree of partial melting of the initial substrate and the temperature of its metamorphic transformation when moving and consolidating in the earth's crust. The author could trace the evolutionary direction in change of chromospinelide and associated sulphides chemical composition. It was determined by the conditions of their depletion in the upper mantle and subsequent metamorphic transformations. The chemical composition of chromospinelides correspond to minerals of upper mantle substrate with a high degree of partial melting (28...41 %) and to chromospinelides from ultrama-*

fites of oceanic trenches. The substrate has undergone plastic metamorphism at temperatures from 844 to 746 °C. Sulphidic mineralization represented by scattered impregnation of heazlewoodite was formed during low-temperature hydrothermal process. The latter contributed to nickel redistribution released from the olivine and orthopyroxene and to its localization as independent mineral phases.

Key words:
Restites, dunites, harzburgites, chromitites, chromospinelides, sulphides, genesis.

REFERENCES

1. Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu., Kubyshev A.I., Katanov S.G. *Perspektivy khromitonosnosti i platinonosnosti giperbazitov Verkhneamylskogo rayona v Zapadnom Sayane* [Prospects of platinum and chromite-bearing *giperbazites* of Verhneamylsky district in the Western Sayan]. *Mineralnye resursy Krasnoyarskogo kraya* [Mineral Resources of the Krasnoyarsk region]. Krasnoyarsk, KNNIIGiMS Publ., 2002. pp. 314–324.
2. Ekhanin D.A. Geologicheskoe stroenie i perspektivy rudonosnosti Kalninskogo ultrabazitovogo massiva [Geological structure and ore-bearing prospects of Kalninsky ultrabazic massif]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2010, no. 9, pp. 24–28.
3. Chernyshov A.I., Yurichev A.N. Petrostrukturnaya evolyutsiya ultramafitov Kalninskogo khromitonosnogo massiva v Zapadnom Sayane [Petrostructural evolution of ultramafic rocks of the Kalninsky chromite-bearing massif, Western Sayan]. *Geotectonics*, 2013, no. 4, pp. 31–46.
4. *Petrologiya i metamorfizm drevnikh ofiolitov (na primere Polyarnogo Urala i Zapadnogo Sayana)* [Petrology and metamorphism of ancient ophiolites (by the example of the Polar Urals and Western Sayan)]. Ed. by V.S. Sobolev, N.L. Dobretsov. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 222 p.
5. Chernyshov A.I. *Ultramafity (plasticheskoe techenie, strukturnaya i petrostrukturnaya neodnorodnost)* [Ultramafics (plastic flow, structural and petrostructural heterogeneity)]. Tomsk, Charodey Publ., 2001. 214 p.
6. Sibilev A.K. *Petrologiya i asbestonosnost ofiolitov (na primere Idzhimskogo massiva v Zapadnom Sayane)* [Petrology and asbestos-bearing of ophiolites (by the example of Idzhimsky massif in the Western Sayan)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 213 p.
7. Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.
8. Pavlov N.V. Khimichesky sostav khromshpinelidov v svyazi s petrograficheskim sostavom porod ultraosnovnykh intruzivov [Chemical composition of chromospinelides in connection with the petrographic composition of the rocks of ultramafic intrusive]. *Trudy Geologicheskogo instituta RAN*, 1949, vol. 103, no. 3, 91 p.
9. Barnes S.J., Roeder P.L. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks. *Journal of petrology*, 2001, vol. 42, no. 12, pp. 2279–2302.
10. Yurichev A.N. Aktsessornye shpinelidy iz ultramafitov: indikatory uslovy formirovaniya [Accessory spinels from ultramafites: indicators of formation conditions]. *Rudy i metally*, 2013, no. 6, pp. 30–34.
11. Dick H.J.B., Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, vol. 84, pp. 54–76.
12. Makeev A.B. *Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala* [Mineralogy of alpine ultrabazites of the Ural]. St. Petersburg, Nauka Publ., 1992. 197 p.
13. Perevozchikov B.V. *Osobennosti izucheniya khromitonosnosti alpinotipnykh giperbazitov* [The peculiarities of chromite-bearing alpine ultramafics]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 47 p.
14. Lesnov F.P., Podlipsky M.Yu. Geokhimiya aktsessornykh khromshpinelidov iz porod Ergakskogo khromitonosnogo giperbazitovogo massiva i usloviya ego formirovaniya (Zapadnyy Sayan) [Geochemistry of accessory chromospinelides from rocks of Ergaksky chromite-bearing ultramafic massif and conditions of its formation (West Sayan)]. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 422, no. 5, pp. 660–664.
15. Fabries J. Spinel-olivine Geotermometry in Peridotites from Ultramafic Complexes. *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1979, vol. 69, no. 4, pp. 329–336.
16. Perevozchikov B.V., Plotnikov A.V., Makiev T.T. Priroda variatsiy sostava rudnoy i aktsessornoy khromshpineli ultrabazitovogo massiva Syum-Keu (Polyarny Ural) [Nature of variations in the composition of the ore and accessory chromespinels from Syum-Kaew ultrabasic massif (Polar Urals)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2007, no. 4, pp. 32–39.
17. Yurichev A.N., Chernyshov A.I. Rudnaya mineralizatsiya idarskogo dunit-gartsburgitovogo kompleksa (Severo-Zapad Vostochnogo Sayana) [Ore mineralization of the Idarsky dunite-harzburgite complex (northwest of Eastern Sayan)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 69–75.
18. Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Rudnaya mineralizatsiya Agardagskogo ultramafitovogo massiva (Respublika Tyva) [Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 130–136.

Received: 12 August 2014.