

УДК 553.461:549.2,5

## АКЦЕССОРНЫЕ САМОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ ОКСИДЫ ИЗ МАССИВНЫХ ХРОМИТИТОВ КЕМПИРСАЙСКОГО УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (ЮЖНЫЙ УРАЛ, КАЗАХСТАН)

Юричев Алексей Николаевич,  
juratur@sibmail.com

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность** исследования обусловлена недостаточной всесторонней изученностью минералогических аспектов ультрамафитовых реститовых массивов, что не дает возможности их обобщения на минералогическом уровне и восстановления полной истории их формирования и преобразования, а также решения целого ряда спорных вопросов петрологии данных объектов. Минералогия самородных металлов и их оксидов из реститовых ультрамафитов является крайне слабо изученным направлением.

**Цель:** изучение минерализации самородных металлов и их оксидов в густовкрапленных и сливных хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива, реконструкция механизма ее формирования.

**Методы:** изучение рудной минерализации в аншлифах с использованием поляризационного микроскопа AxioScope Carl Zeiss; диагностика химического состава рудной минерализации методом рентгеноспектрального микроанализа с применением электронного сканирующего микроскопа Tescan Vega II LMU, оборудованного энергодисперсионным спектрометром (с полупроводниковым Si (Li) детектором INCA x-sight) INCA Energy 350 и волнодисперсионным спектрометром INCA Wave 700.

**Результаты.** Впервые в хромититах Кемпирсайского массива выполнена детальная диагностика акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов, по результатам которой выявлены и охарактеризованы: самородный никель, самородное серебро, самородная медь, самородное железо, аваруит, касситерит, монтепонит, цинкит. Концентрирование рассмотренной минерализации, очевидно, было связано с ее мобилизацией в процессе серпентинизации и преобразования первичных силикатов, а также хромшпинелидов и сульфидов при восстановительных условиях. Образование металлов автор связывает с тенденцией Ni и подчиненного Fe высвободиться из кремнекислородных связей первичного оливина, а Cu и Zn – из связей сульфидов и хромшпинелидов и переходить в форму свободных элементов. Очевидно, привнос части элементов (Cd, Sn) осуществлялся и самими серпентинизирующими растворами. Дальнейшая судьба данных металлов определялась их концентрированием и последующим отложением из высоконасыщенных надкритических флюидов.

### Ключевые слова:

Кемпирсайский массив, хромититы, самородные металлы, типоморфизм, химический состав, генезис.

### Введение

Ультрамафитовые реститовые массивы преимущественно дунит-гарцбургитового состава являются составной частью мафит-ультрамафитовых поясов складчатых областей. В последние несколько десятилетий они привлекают все большее внимание исследователей как с позиции генезиса, учитывая их мантийную природу образования и связь с ранними этапами развития складчатых сооружений, так и с позиции рудоносности – своей промышленной хромитианосностью с включением минералов ЭПГ, асбестоносностью и никеленосностью гипергенной природы (коры выветривания).

Из рудной минерализации, отмечаемой в реститовых ультрамафитах (собственно дунит-гарцбургитовый субстрат и хромититы, без учета зон гипергенеза), только минералогия шпинелидов и минералов ЭПГ является в настоящее время наиболее хорошо изученным разделом [1–13], другие рудные минералы, в частности самородные металлы и их оксиды – в литературе освещены значительно слабее.

Спорность многих аспектов петрологии реститовых ультрамафитов обусловлена недостаточной всесторонней изученностью данных массивов на минералогическом уровне. Известно, что одним из главных носителей генетической информации в первую очередь является минерал, а не порода. Изучив в достаточной степени минералогию

объекта, можно восстановить историю его образования и преобразования.

Трудности в диагностике самородных металлов и их природных сплавов связаны с их крайне малыми размерами (до 50 мкм), а также с их очень незначительным содержанием в породах. С помощью рентгеноспектрального микроанализа [14] выполнено комплексное изучение акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов в образцах массивных хромититов, отобранных в карьере «Объединенный» крупнейшего в мире «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива. В работе приведена химическая типизация минералов, а также сделано предположение об условиях и механизме их формирования.

### Краткая геологическая характеристика исследуемого объекта

Кемпирсайский массив является крупнейшим массивом ультрамафитов на юге Урала и хорошо известен благодаря своим уникальным по размеру месторождениям хромитов. Он сложен метаморфическими (тектонизированными) ультрамафитами офиолитовой ассоциации, располагающимися в крупном Сакмарском аллохтоне, представляющем собой реликт океанической коры раннепалеозойского возраста, шарьированный в позднем палеозое на восточную окраину Восточно-Европей-

ского палеоконтинента при закрытии Уральского палеоокеана [15–17].

На современном эрозионном срезе Кемпирсайский массив имеет грушевидную вытянутую форму, резко расширяющуюся с севера на юг от 0,6 до 31,6 км. Его общая площадь составляет более 900 км<sup>2</sup>, контакты массива с вмещающими породами девона, ордовика и докембрия тектонические (рис. 1).

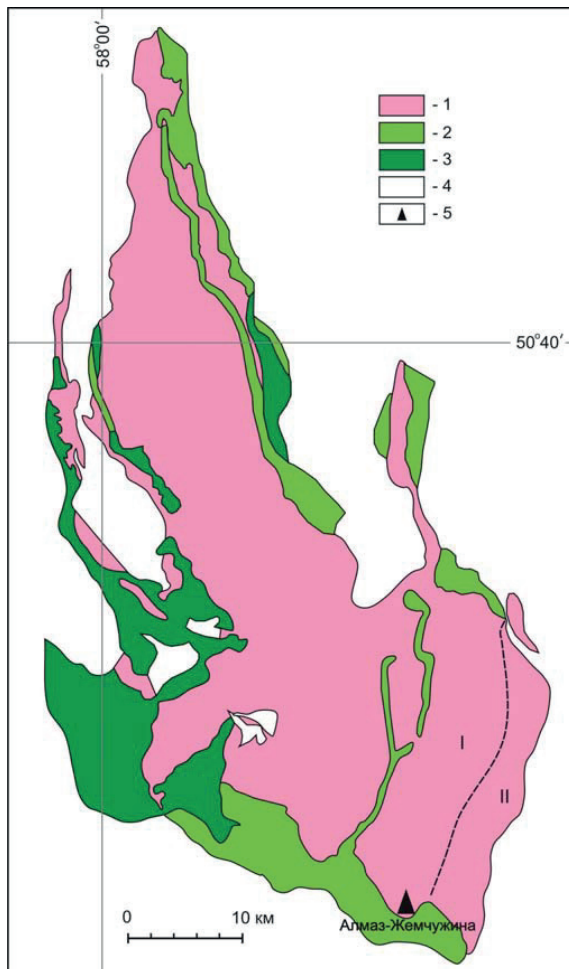


Рис. 1. Схематизированная геологическая карта Кемпирсайского ультрамафитового массива (по Н.В. Павлову, И.И. Григорьевой [18], с корректировками автора): 1 – дунит-гарцбургит-лерцолитовая серия пород; 2 – клинопироксенит-габбровые комплексы; 3 – оливиновые и роговообманковые габбро, троктолиты и параллельные диабазовые дайки; 4 – вмещающие вулканогенно-осадочные породы (PR-D); 5 – местоположение исследуемого «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения в структуре Кемпирсайского массива. Субмеридиональные зоны Главного (Южно-Кемпирсайского) рудного поля: I – Западная, II – Восточная

Fig. 1. Schematic geological map of Kempirsai ultramafic massif (by N.V. Pavlov, I.I. Grigoryeva [18], with corrections by author): 1 – dunite-harzburgite-herzolite series of rocks; 2 – clinopyroxenite-gabbro complexes; 3 – olivine and hornblende gabbro, troctolites and parallel diabasic dikes; 4 – enclosing volcanic-sedimentary rocks (PR-D); 5 – location of studied «Almaz-Zhemchuzhina» chromite deposit in structure of Kempirsai massif. Submeridional zones of the Main (South Kempirsai) ore field: I – Western, II – Eastern

В северной и центральной части массив сложен в основном гарцбургитами, энстатитовыми дунитами с подчиненным количеством плагиодунитов, пироксенитов, верлитов и плагиоверлитов, по периферии распространены габброиды (габбро, габбро-нориты и оливиновое габбро); в южной и юго-восточной части выделяются две субмеридиональные зоны (западная и восточная), сложенные крупными телами массивных дунитов, залегающих среди пород шширово-полосчатого комплекса, энстатитовых дунитов и гарцбургитов с подчиненным количеством верлитов и лерцолитов [18]. В пределах этих двух зон расположены основные хромитовые месторождения, образующие Главное рудное поле.

Хромитовые месторождения обычно состоят из серии сближенных линзовидных и реже жилкообразных рудных тел, размеры которых варьируют по протяженности от первых десятков метров до ~1,5 км, при мощностях от первых метров до ~150 м. Они образованы преимущественно массивными хромититами, состоящими на 90...95 % из грубо-, крупнозернистого агрегата зерен хромшпинелидов и небольшого количества карбонатов и вторичных силикатов (серпентина, киммеррита, уваровита и др.) в интерстициях этих зерен. В периферийных частях рудных тел помимо массивного текстурного типа распространены также нодулярные и густовкрапленные руды, которые быстро выклиниваются по мере удаления от рудного тела [18].

В настоящее время на балансе Кемпирсайского массива числится 427 млн т разведанных запасов хрома [19]. При этом более половины всех балансовых запасов и около 70 % добычи приходится на крупнейшие месторождения «Алмаз-Жемчужина» и «Миллионное».

#### Акцессорная минерализация самородных металлов и их оксидов

При изучении вещественного состава хромшпинелидов и акцессорных сульфидов в густовкрапленных и сливных хромититах (рис. 2), отобранных в карьере «Объединенный» «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива, автором было диагностировано единичные мелкие (до 0,04 мм) проявления самородных металлов и их оксидов. Полученные результаты позволили подтвердить в составе хромититов наличие самородной меди, самородного железа и аварунита (FeNi<sub>3</sub>), которые были отмечены при более ранних исследованиях, но не были подробно охарактеризованы [2, 20], а также впервые выявить и описать в составе хромитовых руд самородный никель, самородное серебро, касситерит (SnO<sub>2</sub>), монтепонит (CdO) и цинкит (ZnO) (рис. 3).

Самородный никель отмечается в виде одиночных округлых каплевидных выделений с коррозионными краями в интерстициях зерен хромшпинелидов (рис. 3, а). Размеры таких выделений

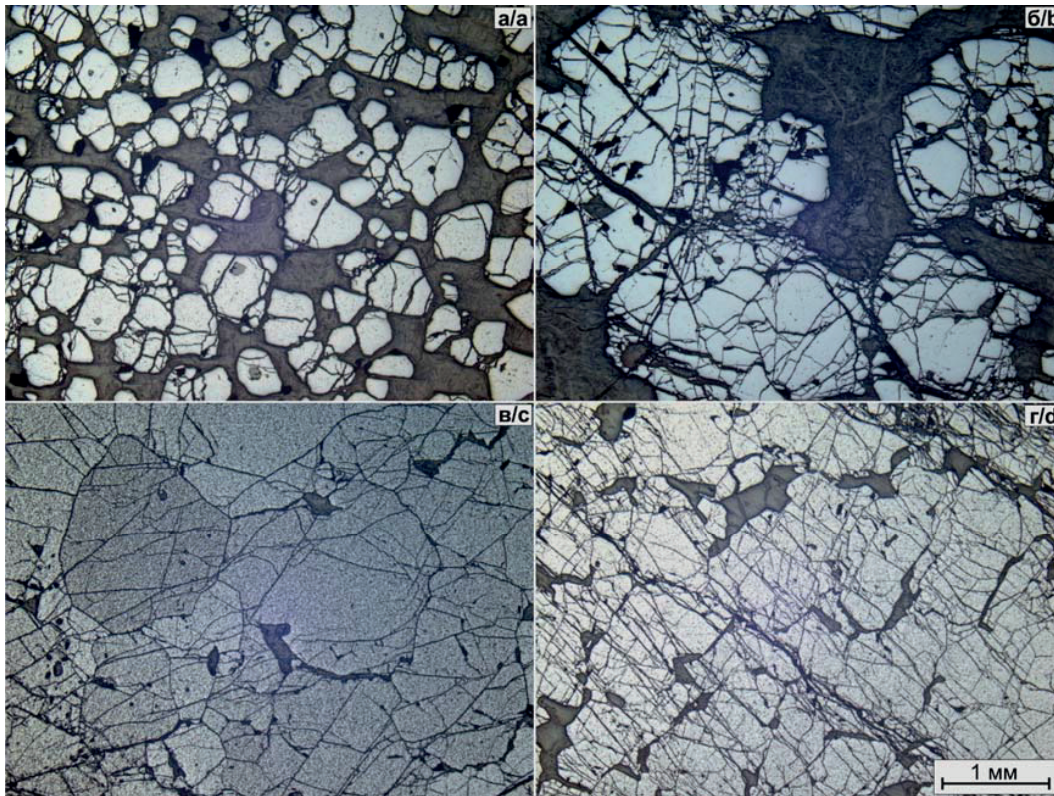


Рис. 2. Густовкрапленные (а, б) и сливные (в, г) хромититы «Алмаз-Жемчужина» хромитового месторождения Кемпирсайского ультрамафитового массива (микрофотографии шлифов в отраженном свете)

Fig. 2. Densely disseminated (a, b) and massive (c, d) chromitites of «Almaz-Zhemchuzhina» chromite deposit of Kempirsai ultramafic massif (photomicrographs polished sections in reflected light)

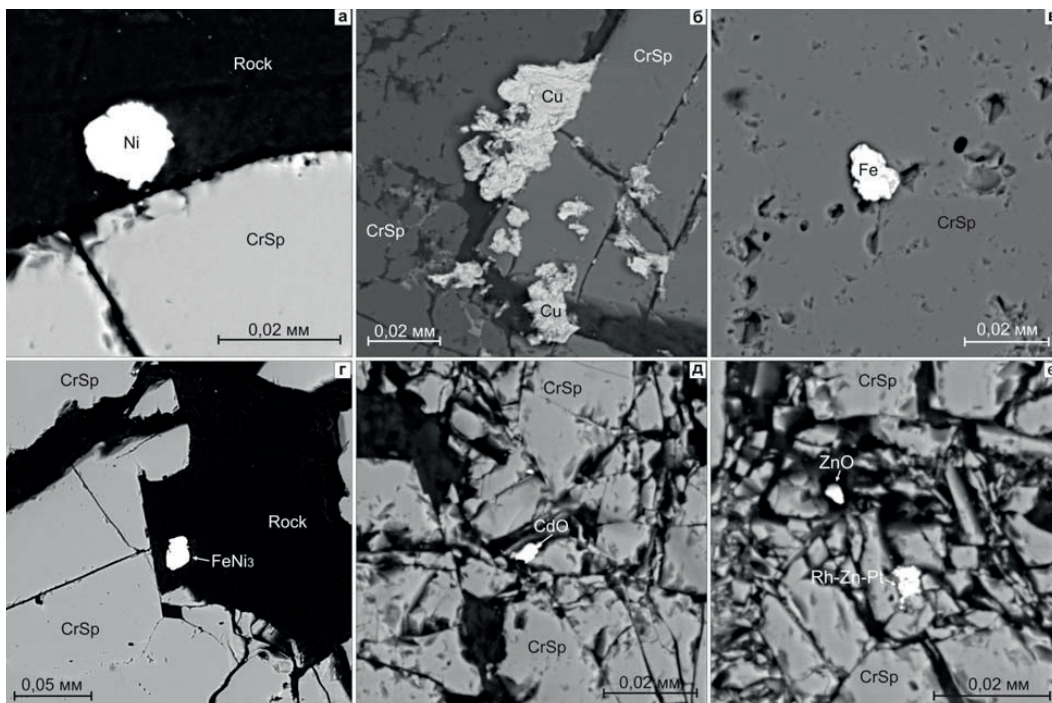


Рис. 3. Минерализация самородных металлов и их оксидов в хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива (снимки в режиме BSE): CrSp – хромшпинелид; Rock – хлорит-серпентиновый агрегат

Fig. 3. Mineralization of native metals and their oxides in chromitites of Kempirsai ultramafic massif (images in BSE mode): CrSp – chromospinelide; Rock – chlorite-serpentine aggregate

не превышаю 0,02 мм. В химическом составе минерала постоянно обнаруживается примесь Fe (до 11 %) и Cu (до 5 %) (рис. 4, таблица).

Самородное серебро – большая редкость для ультраосновных пород. К настоящему времени из-

вестно всего несколько сообщений о находках серебра в респитовых ультрамафитах Урала: в серпентинитах Кемпирсайского массива (Южный Урал) [20] и в сульфидном концентрате хромитовой руды массива Рай-Из (Полярный Урал) [5, 21]. При этом

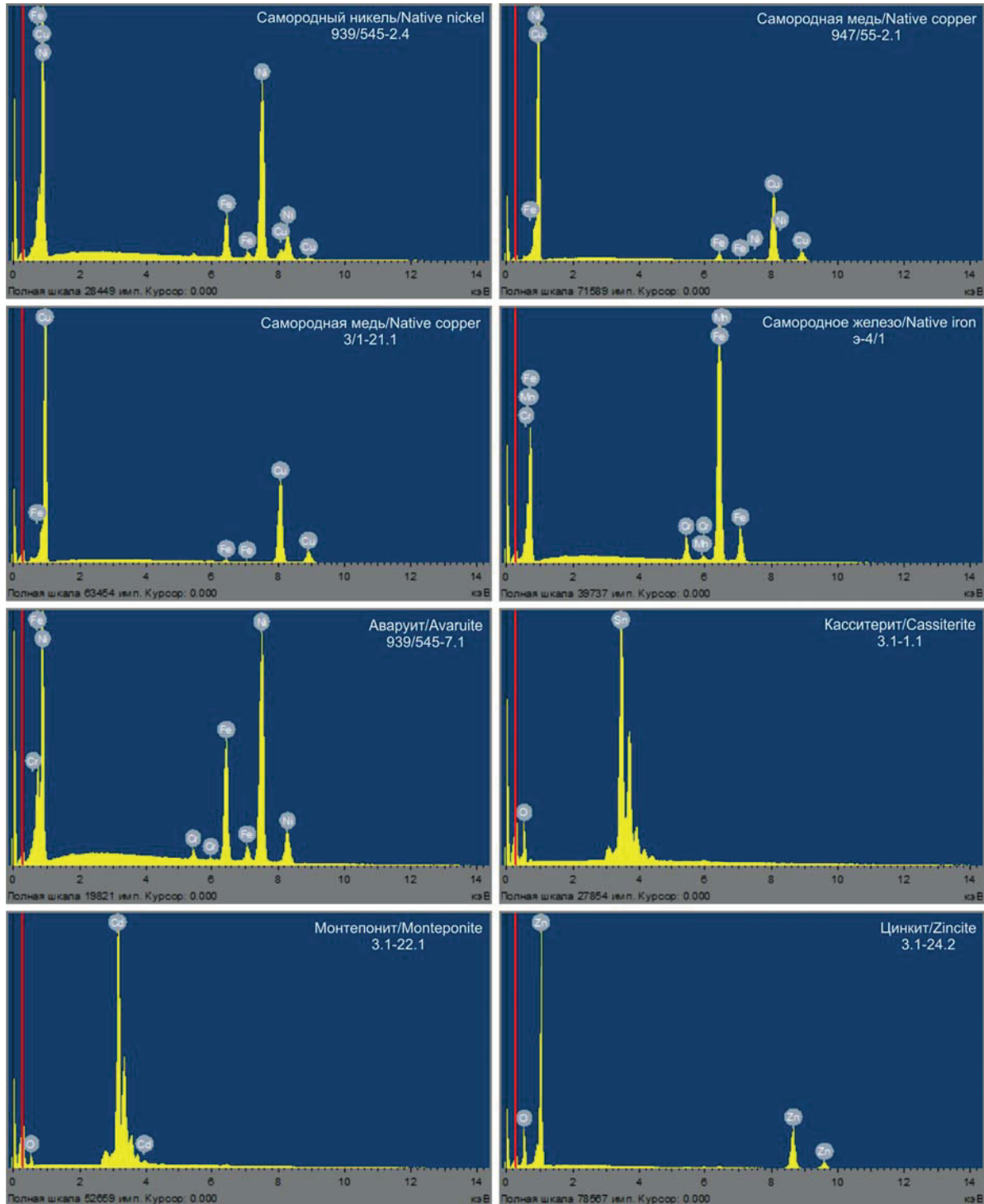


Рис. 4. Диаграммы химических составов самородных металлов и их оксидов из массивных хромититов Кемпирсайского ультрамафитового массива, полученные на электронном сканирующем микроскопе «Tescan Vega II LMU» с системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford INCA Energy 350

Fig. 4. Diagrams of chemical compositions of native metals and their oxides from massive chromitites of Kempirsai ultramafic massif, obtained on electronic scanning microscope «Tescan Vega II LMU» with the X-ray spectral analysis system Oxford INCA Energy 350

**Таблица.** Химический состав самородных металлов и их оксидов в хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива, вес. %  
**Table.** Chemical composition of native metals and their oxides in chromitites of Kempirsai ultramafic massif, wt. %

Минерал/Mineral	Образец/Sample	Ni	Cu	Fe	Mn	Zn	Sn	Cd	Cr	O	Сумма/Sum
Самородный никель/Native nickel	939/545-2.1	82,96	4,57	10,89	–	–	–	–	–	–	98,42
	939/545-2.4	83,67	4,83	10,86	–	–	–	–	–	–	99,36
Самородная медь/Native copper	947/55-2.1	1,00	94,30	3,36	–	–	–	–	–	–	98,66
	3/1-21.1	–	98,67	0,45	–	–	–	–	–	–	99,12
Самородное железо/Native iron	а-4/1	–	–	94,66	0,55	–	–	–	4,80	–	100,01
	а-4/2	–	–	95,12	0,47	–	–	–	4,02	–	99,61
Аваруит/Avanuite	939/545-5.1	73,42	–	24,74	–	–	–	–	1,63	–	99,79
	939/545-5.2	74,35	–	24,17	–	–	–	–	1,39	–	99,90
	939/545-7.1	74,88	–	23,69	–	–	–	–	1,43	–	100,00
	939/545-7.2	74,86	–	23,53	–	–	–	–	1,61	–	100,00
Касситерит/Cassiterite	3/1-1.1	–	–	–	–	–	74,71	–	–	25,12	99,83
	3/1-1.2	–	–	–	–	–	75,82	–	–	23,96	99,78
Монтепонит/Monteponite	3/1-22.1	–	–	–	–	–	–	86,16	–	13,85	100,01
Цинкит/Zincite	3/1-24.2	–	–	–	–	80,00	–	–	–	19,55	99,55

*Примечание.* Анализы выполнены на электронном сканирующем микроскопе «Тескан Вега 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 Е.В. Корбовяк. Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ (ток 5 нА, время набора 120 сек) и диаметре зонда 1...2 мкм. В качестве эталонов сравнения применялись стандарты МАС (55 standard Universal Block Layout + F/Cup № 6835). Для исследования использованы образцы хромититов из коллекции профессора Томского государственного университета А.И. Чернышова.

*Note.* The analyzes were performed on scanning electron microscope Tescan Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 350 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700 at the Analytical Center for Geochemistry of Natural Systems of Tomsk State University (Tomsk), operator is E.V. Korbovyak. The measurements were carried out on tungsten cathode at accelerating voltage of 20 kV (current 5 nA, dialing time 120 s) and probe diameter 1...2 μm. As standards of comparison, the standards of MAS (55 standard Universal Block Layout + F/Cup № 6835) were used. For the study, chromitite samples from collection of professor of Tomsk State University A.I. Chernyshov are used.

сведения о составе самородного серебра авторами сообщений, кроме А.Б. Макеева, не приводятся, видимо, из-за малых размеров обнаруженных ими выделений минерала.

Автором встречено единственное мелкое (~8...9 мкм) сгустковидное выделение серебра в хромитовом цементе сливного хромитита. Согласно проведенному анализу, главными изоморфными примесями химического состава выявленного самородного серебра являются цинк и хром: Ag=98,97 %, Zn=0,77 %, Cr=0,26 %. Нетипичная для серебра примесь хрома в химическом составе ранее отмечалась также А.Б. Макеевым в хромититах массива Рай-Из [5].

Самородная медь образует довольно крупные по отношению к другим самородным металлам (до 0,05 мм) выделения сноповидной, ветвистой и неправильной формы (рис. 3, б). Чаще встречается в виде изолированных образований, но отмечены срастания с халькопиритом, пентландитом и окисными минералами. В химическом составе самородной меди постоянно отмечается примесь Fe (до 3,5 %), реже – Ni (до 1,0 %) (рис. 4, таблица). Содержание данных элементов в ее химическом составе является типичным и ранее неоднократно отмечалось в самородной меди хромитовых руд Полярного Урала [5].

Самородное железо формирует изолированные сгустковидные, округлые или неправильные выделения размером до 0,02 мм непосредственно в зернах метаморфизованных хромшпинелидов (в хромитовом цементе) либо в серпентиновом субстрате

в интерстициях между ними (рис. 3, в). Более редкой является его ассоциация с вторичным магнетитом. В химическом составе самородного железа отмечается примесь Cr (до 4,8 %) и Mn (до 0,5 %) (рис. 4, таблица).

В качестве металлического твердого раствора Fe и Ni в интерстициях хромшпинелидов диагностированы нередкие округлые и неправильные проявления аваруита, размером до 0,04 мм (рис. 3, г). Химический состав выявленных аваруитов близок стехиометрическому, а также химическим составам данного минерала из ультрамафитового массива г. Солдатской (п-ов Камчатский мыс, Восточная Камчатка) [22] и океанических перидотитов Срединно-Океанического хребта (Атлантический океан) [23]. Однако отличается от последних постоянным присутствием в химическом составе Cr (до 1,7 %), который, очевидно, входит в состав минерала, «загрязняя» его, в виде тонкодисперсной механической примеси (рис. 4, таблица).

Оксиды Sn, Cd и Zn диагностированы в хромититах Кемпирсайского массива предположительно впервые (?). Они отмечены в виде редких мелких (до 0,005 мм) округлых или неправильных по форме обособлений, заполняющих пустотки и каверны внутри преимущественно трещиноватых, раздробленных зерен хромшпинелидов (рис. 3, д, е). Их химические составы характеризуются относительной «чистотой» (отсутствием примесей других компонентов) и несколько отклоняются от стехиометрических (рис. 4, таблица).

Автором зафиксировано, что цинкит постоянно отмечается вблизи выделений металлических твердых растворов ЭПГ с цветными металлами (системы Rh–Zn–Pt и Rh–Zn).

#### Выводы

Впервые в массивных хромититах Кемпирсайского ультрамафитового массива выполнена детальная диагностика акцессорной минерализации самородных металлов и их оксидов. Самородные медь и железо, а также аваруит отмечались в хромититах и при более ранних исследованиях [2, 20], но не были подробно охарактеризованы в связи с решением других научных и производственных задач. Впервые в хромититах массива обнаружены: самородный никель, самородное серебро, оксиды олова, кадмия и цинка.

В настоящее время актуальность исследования обуславливается выявлением ранее в составе аваруита примеси Ir (до 1,0 %), Pt (до 0,1 %) и Pd (до 0,2 %) [2], а также прослеживающейся маркерной ролью цинкита при обнаружении твердых раство-

ров ЭПГ с цветными металлами систем Rh–Zn–Pt и Rh–Zn.

Концентрирование рассмотренной минерализации, очевидно, связано с ее мобилизацией в процессе серпентинизации и преобразования первичных силикатов, прежде всего оливина, а также находящихся с ними в парагенезисе сульфидов и шпинелей при восстановительных условиях [20, 24, 25]. Образование металлов автор связывает с тенденцией Ni и подчиненного Fe высвобождаются из кремнекислородных связей первичного оливина, а Cu и Zn – из связей сульфидов и хромшпинелидов соответственно. Очевидно, что наряду с восстановлением самородных металлов из первичных силикатов, сульфидов или хромшпинелидов, возможен привнос части элементов (Cd, Sn) самими серпентинизирующими растворами.

*Автор благодарит профессора Томского политехнического университета А.К. Мазурова за внимательную проработку статьи и ценные замечания и профессора Томского государственного университета В.П. Парначева за консультацию по вопросу геодинамической позиции Южного Урала.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала / Л.И. Гурская, Л.В. Смелова, Л.Р. Колбанцев, В.Д. Ляхницкая, Ю.С. Ляхницкий, С.Н. Шахова. – СПб.: Изд-во СПб картерфабрики ВСЕГЕИ, 2004. – 306 с.
2. Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field // *Geology of Ore Deposits*. – 2003. – V. 45. – № 1. – P. 37–65.
3. Origin of platinum group minerals (PGM) inclusions in chromite deposits of the Urals / F. Zaccarini, G. Garuti, O. Thalhammer, E. Pushkarev // *Minerals*. – 2018. – V. 8. – № 9. – P. 1–21.
4. Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала / Д.Е. Савельев, В.И. Сначев, Е.Н. Савельева, Е.А. Бажин. – Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. – 320 с.
5. Макеев А.Б. Минералогия альпинотипных ультрабазитов Урала. – СПб.: Наука, 1992. – 197 с.
6. Юричев А.Н. Критерии регионального и локального прогнозирования потенциальной хромитоносности подформных ультрамафитовых массивов складчатых областей // *Руды и металлы*. – 2016. – № 3. – С. 5–14.
7. Закономерности размещения и образования хромитовых месторождений / Л.И. Колодилов, С.М. Горяев, И.М. Крутилин, В.П. Прищепчик // Закономерности размещения и образования магнетитовых и хромитовых месторождений Мугодзар и Тургайского прогиба. – Алма-Ата: КазИМС, 1968. – С. 249–279.
8. Deformation-induced decomposition of enstatite in mantle peridotite and its role in partial melting and chromite ore formation / D.E. Saveliev, V.N. Puchkov, S.N. Sergeev, I.I. Musabirov // *Doklady Earth Sciences*. – 2017. – V. 476. – № 1. – P. 1058–1061.
9. Metamorphic evolution of sulphide-rich chromitites from the Chernichevo ultramafic massif, SE Bulgaria / J.M. González-Jiménez, F. Gervilla, A. Casado-González, V. Colás, T.N. Kerestdjian, I. Sergeeva, I. Fanlo // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – V. 101. – P. 330–348.
10. Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбояк Е.В. Минералы платиновой группы из хромитов Кемпирсайского ультрамафитового массива (Мугодзары, Казахстан): новые данные // *Записки Российского минералогического общества*. – 2019. – Т. 148. – № 2. – С. 76–86.
11. Юричев А.Н. Рудные хромшпинелиды массивов Сьум-Кеу и Харчерузский: химизм и генетическая природа, Полярный Урал // *Руды и металлы*. – 2017. – № 2. – С. 51–59.
12. Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonik history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq // *Geological magazine*. – 2011. – V. 148. – P. 802–818.
13. Testing the validity of chrome spinel chemistry as a provenance and petrogenetic indicator / M.R. Power, D. Pirrie, J.C. Andersen, P.D. Wheeler // *Geology*. – 2000. – V. 28. – P. 1027–1030.
14. Reed S.J.B. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. – N.Y.: Cambridge University Press, 2005. – 189 p.
15. Мазуров А.К. Геодинамические обстановки формирования металлогенических комплексов Казахстана: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 43 с.
16. Fershtater G.B. Magmatism in the epochs of Ural paleocean closure and mobile belt development: composition, distinctive evolutionary features, and sources // *Petrology*. – 2013. – V. 21. – № 2. – P. 181–202.
17. История развития Уральского палеоокеана: сборник статей / Л.П. Зоненшайн, В.В. Матвеевков. – М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1984. – 164 с.
18. Павлов Н.В., Григорьева И.И. Месторождения хрома / Рудные месторождения СССР. Т. 1. – М.: Недра, 1978. – С. 172–224.
19. Справочник. Месторождения хрома, никеля, кобальта, ванадия Казахстана. 2-издание / Б.К. Нурабаев, А.А. Надырбаев, М.К. Тулегенов, Ж.Б. Тансыкбаева. – Алматы: РГП ПХВ «Информационно-аналитический центр геологии и минеральных ресурсов РК», 2015. – 258 с.
20. Смирнова Т.А. Теллурическое железо в ультраосновных породах Кемпирсайского плутона // *Записки Всесоюзного минералогического общества*. – 1970. – Ч. 99. – Вып. 6. – С. 745–748.
21. Строение, эволюция и минерогения гипербазитового массива Рай-Из / под ред. В.Н. Пучкова, Д.С. Штейнберга. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 228 с.
22. Пентландиты и аваруиты гипербазитового массива горы Солдатской (п-ов Камчатский мыс, Восточная Камчатка) /

- Р.М. Новаков, С.В. Москалева, В.В. Иванов, С.В. Паламарь // Вестник КРАУНЦ, Науки о земле. – 2014. – № 2. – С. 137–146.
23. Базылев Б.А. Развитие аваритсодержащей минеральной ассоциации в перидотитах из зоны разлома 15°20' (Атлантический океан) как одно из проявлений океанического метаморфизма // Российский журнал наук о Земле. – 2000. – Т. 2. – № 3–4. – С. 279–293.
24. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in the Kempirsai massif // *Geology of Ore Deposits*. – 2009. – V. 51. – № 2. – P. 123–138.
25. Леснов Ф.П. Петрология полигенных мафит-ультрамафитовых массивов Восточно-Сахалинской офиолитовой ассоциации. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2015. – 240 с.
- Поступила 26.04.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Юричев А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры петрографии геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 553.461:549.2,5

## ACCESSORY NATIVE METALS AND THEIR OXIDES FROM MASSIVE CHROMITITES OF KEMPIRSAI ULTRAMAFIC MASSIF (SOUTH URAL, KAZAKHSTAN)

Alexey N. Yurichev,

juratur@sibmail.com

National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is caused by weakly elaboration of mineralogical aspects of ultramafic restitic massifs, which does not allow their generalization at mineralogical level and restoration of complete history of their formation and transformation, as well as solution of number of controversial questions of petrology of these objects. The mineralogy of native metals and their oxides from restitic ultramafites is extremely poorly studied direction.

**The main aim** of the research is to study the mineralization of native metals and their oxides in densely disseminated and massive chromitites of Kempirsai ultramafic massif, reconstruction of mechanism of its formation.

**The methods:** study of ore mineralization in polished sections using a polarizing microscope AxioScope Carl Zeiss; determination of chemical composition of ore mineralization by the method of X-ray spectrum microanalysis using scanning electron microscope TESCAN Vega II LMU, equipped with energy-dispersive spectrometry (with a semiconductor Si (Li) detector INCA x-sight) INCA Energy 450 and wave-dispersive spectrometer INCA Wave 700.

**The results.** The authors have made an attempt to perform detailed diagnostics of accessory mineralization of native metals and their oxides in the chromitites of Kempirsai massif. According to the results native nickel, native silver, native copper, native iron, avaruite, cassiterite, monteponite and zincite were identified and characterized. Concentration of mineralization examined was apparently due to its mobilization in serpentinization and transformation of primary silicates, as well as chromospinelides and sulphides under reducing conditions. The author associates formation of metals with tendency of Ni and subordinate Fe to be liberated from the silicon-oxygen bonds of primary olivine, and Cu and Zn from bonds of sulfides and chromospinelides and transform into form of free elements. Obviously, introduction of a part of elements (Cd, Sn) was carried out by serpentinizing solutions themselves. The further fate of these metals was determined by their concentration and subsequent deposition from highly saturated supercritical fluids.

### Key words:

Kempirsai massif, chromitites, native metals, typomorphism, chemical composition, genesis.

The author appreciates A.K. Mazurov, professor of Tomsk Polytechnic University, for detailed paper study and valuable commentaries and V.P. Parnachev, professors of Tomsk State University, for consultation on geodynamic position of Southern Ural.

### REFERENCES

- Gurskaya L.I., Smelova L.V., Kolbantsev L.R., Lyakhnitskaya V.D., Lyakhnitskiy Yu.S., Shakhova S.N. *Platinoidy khromitonosnykh massivov Polyarnogo Urala* [Platinoids of the chromite-bearing massifs of the Polar Urals]. St-Petersburg, SPb kartfabriki VSEGEI Publ., 2004. 306 p.
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A. Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geology of Ore Deposits*, 2003, vol. 45, no. 1, pp. 37–65.
- Zaccarini F., Garuti G., Thalhhammer O., Pushkarev E. Origin of platinum group minerals (PGM) inclusions in chromite deposits of the Urals. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 9, pp. 1–21.
- Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A. *Geologiya, petrogeokhimiya i khromitonosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromite-bearing of gabbro-hyperbasitic massifs of Southern Urals]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 2008. 320 p.
- Makeev A.B. *Mineralogiya alpinotipnykh ultrabazitov Urala* [Mineralogy of alpinotypic ultrabasites of the Urals]. St-Petersburg, Nauka Publ., 1992. 197 p.
- Yurichev A.N. Criteria of regional and local prediction of potential chromaticity of podiform ultramafic massifs of folded regions. *Rudy i metally*, 2016, no. 3, pp. 5–14. In Rus.
- Kolotilov L.I., Goryaev S.M., Krutinin I.M., Prishchepchik V.P. Zakonomernosti razmeshcheniya i obrazovaniya khromitovykh mestorozhdeniy [Regularities of location and formation of chromite deposits]. *Zakonomernosti razmeshcheniya i obrazovaniya magnetitovykh i khromitovykh mestorozhdeniy Mugodzhar i Turgayskogo progiba* [Regularities of location and formation of magnetite and chromite deposits of Mugodzhar and Turgai trough]. Alma-Ata, KazIMS Publ., 1968. pp. 249–279.
- 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, vol. 476, no. 1, pp. 1058–1061.
- González-Jiménez J.M., Gervilla F., Casado-González A., Colás V., Kerestedjian T.N., Sergeeva I., Fanlo I. Metamorphic evolution of sulphide-rich chromitites from the Chernichevo ultramafic massif, SE Bulgaria. *Ore Geology Reviews*, 2018, vol. 101, pp. 330–348.
- Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. Platinum group minerals from chromitites of Kempirsai ultramafic massif (the South Urals): new data. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2019, vol. 148, no. 2, pp. 76–86. In Rus.
- Yurichev A.N. Ore chromospinelides of Syum-Keu and Harcheruzsky massifs: chemistry and genetic nature, the Polar Urals. *Rudy i metally*, 2017, no. 2, pp. 51–59. In Rus.
- Aswad K.J.A., Aziz N.R.H., Koyi H.A. Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petrotectonik history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq. *Geological Magazine*, 2011, vol. 148, pp. 802–818.
- Power M.R., Pirrie D., Andersen J.C., Wheeler P.D. Testing the validity of chrome spinel chemistry as a provenance and petrogenetic indicator. *Geology*, 2000, vol. 28, pp. 1027–1030.
- Reed S.J.B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. N.Y., Cambridge University Press, 2005. 189 p.



15. Mazurov A.K. *Geodinamicheskie obstanovki formirovaniya metallogenicheskikh kompleksov Kazakhstana*. Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [Geodynamic conditions of formation of metallogenic complexes of Kazakhstan. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 43 p.
16. Fershtater G.B. Magmatism in the epochs of ural paleocean closure and mobile belt development: composition, distinctive evolutionary features, and sources. *Petrology*, 2013, vol. 21, no. 2, pp. 181–202.
17. *Istoriya razvitiya Uralskogo paleookeana: Sbornik statey* [History of development of Ural paleocean: Collection of articles]. Moscow, Institut okeanologii im. P.P. Shirshova AN SSSR Publ., 1984. 164 p.
18. Pavlov N.V., Grigoreva I.I. Mestorozhdeniya khroma [Chromium deposits]. *Rudnye mestorozhdeniya SSSR* [Ore deposits of the USSR]. Moscow, Nedra Publ., 1978. Vol. 1, pp. 172–224.
19. Nurabaev B.K., Nadyrbaev A.A., Tulegenov M.K., Tansykbaeva Zh.B. *Spravochnik. Mestorozhdeniya khroma, nikelya, kobalta, vanadiya Kazakhstana* [Directory. Deposits of chromium, nickel, cobalt, vanadium of Kazakhstan] Almaty, RGP PKHV «Informatsionno-analiticheskiy tsentr geologii i mineralnykh resursov RK» Publ., 2015. 258 p.
20. Smirnova T.A. Telluricheskoe zhelezo v ultraosnovnykh porodakh Kempirsayskogo plutona [Telluric iron in ultramafic rocks of Kempirsai pluton]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*, 1970, vol. 99, no. 6, pp. 745–748.
21. *Stroenie, evolyutsiya i minerageniya giperbazitovogo massiva Ray-Iz* [Structure, evolution and mineralogy of Ray-Iz hyperbasitic massif]. Eds. V.N. Puchkov, D.S. Shteinberg. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1990. 228 p.
22. Novakov R.M., Moskaleva S.V., Ivanov V.V., Palamar S.V. Pentlandites and avaruities of hyperbasitic massif of Soldatskaya mountain (Kamchatsky cape peninsula, Eastern Kamchatka). *Vestnik KRAUNTS. Nauki o zemle*, 2014, no. 2, pp. 137–146. In Rus.
23. Bazylev B.A. Razvitie avaruitsoderzhashchey mineral'noy assotsiatsii v peridotitakh iz zony razloma 15°20' (Atlanticheskii okean) kak odno iz proyavleniy okeanicheskogo metamorfizma [The development of avaruite-containing mineral association in peridotites from the fault zone 15°20' (Atlantic Ocean) as one of manifestations of oceanic metamorphism]. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2000, vol. 2, no. 3–4, pp. 279–293. In Rus.
24. Chashchukhin I.S., Votyakov S.L. Behavior of iron-group elements, oxybarometry, and genesis of unique chromite deposits in the Kempirsai massif. *Geology of Ore Deposits*, 2009, vol. 51, no. 2, pp. 123–138.
25. Lesnov F.P. *Petrologiya poligennykh mafit-ultramafitovykh massivov Vostochno-Sakhalinskoy ofiolitovoy assotsiatsii* [Petrology of polygenic mafic-ultramafic massifs of the East Sakhalin ophiolitic association]. Novosibirsk, Geo Publ., 2015. 240 p.

Received: 26 April 2018.

#### Information about the authors

Alexey N. Yurichev, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk State University.