
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

**МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ В ХРОМИТИТАХ АГАРДАГСКОГО
УЛЬТРАМАФИТОВОГО МАССИВА (РЕСПУБЛИКА ТЫВА): НОВЫЕ ДАННЫЕ**

© 2022 г. А. Н. Юричев*

*Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, Томск, 634050 Россия***e-mail: juratur@sibmail.com*

Поступила в редакцию 22.04.2022 г.

После доработки 17.05.2022 г.

Принята к публикации 14.06.2022 г.

В средне- и густовкрапленных хромититах Агардагского ультрамафитового массива, входящего в состав Южно-Тувинского офиолитового пояса и являющегося одним из наиболее крупных массивов Тывы, впервые обнаружены мелкие выделения минералов элементов платиновой группы (ЭПГ). По химическому составу они подразделяются на три основные группы: самородные металлы и их природные сплавы (металлические твердые растворы Os–Ir–Ru, рутенийиридий), дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда и их мышьяксодержащие разновидности и сульфоарсениды (ирарсит, холлингвортит). Выявленные группы минералов ЭПГ характеризуются Os–Ir–Ru специализацией. Исключением является только легкоплавкий платиноид – родий, который отмечен в виде самостоятельного минерального вида – холлингвортита. Платина и палладий не обнаружены ни в виде самостоятельных минералов, ни в виде примеси в других минералах. Ведущая роль в составе металлических твердых растворов осмия, очевидно, свидетельствует о значительном участии данного элемента в ранних парагенезисах и его наиболее ранней мобилизации из “материнского” лерцолитового субстрата. Однако уже в сульфидах доминирующие позиции занимает рутений, который, в свою очередь, в сульфоарсенидах уступает это место иридию и родию. Процесс формирования ассоциации выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются металлические твердые растворы Os–Ir–Ru и дисульфиды лаурит-эрлихманитового ряда. Остальные обнаруженные минералы ЭПГ относятся к более поздним образованиям и связаны с процессами мантийно-корового метасоматоза, когда при воздействии восстановленных флюидов происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ.

Ключевые слова: республика Тыва, офиолиты, Агардагский массив, реститовые ультрамафиты, минералы ЭПГ, химический состав, генезис

DOI: 10.31857/S0869605522040098

Агардагский ультрамафитовый массив (R_3) является одним из наиболее крупных массивов Тывы и характеризуется протяженностью около 23 км при ширине до 3.5 км. Он входит в состав Южно-Тувинского офиолитового пояса и структурно приурочен к Агардагской шовной зоне, которая отделяет Сангиленский срединный массив от раннекаледонской Восточно-Таннуольской складчатой зоны (Pfander et al., 2002; Козаков и др., 2003). Массив ориентирован согласно складчатости вмещающих его венд-нижнекембрийских толщ (кристаллических сланцев с прослоями известняков, кремнистых и терригенных пород) и имеет с ними повсеместно тектонические контакты, круто падающие (75° – 80°) на северо-запад (Гончаренко, 1989; Агафонов и др., 2005). В его строении участвуют в разной степени серпентинизированные дуниты и гарцбургиты.

ты, а также в основном антигоритовые и в меньшей степени антигорит-хризотилитовые серпентиниты, которые претерпели интенсивные пластические деформации и постоянно обнаруживают признаки метаморфических пород (Пешков и др., 2021). В полях развития дунитов выявлено большое количество хромитовых рудопроявлений, которые образуют линзовидные, полосчатые и шпировидные тела (Агафонов и др., 2005; Юричев и др., 2013). Наряду с ультрамафитами в массиве присутствуют небольшие дайко- и штокообразные тела габбро-диабазов и диабазов, которые нередко превращены в родингиты (Агафонов и др., 2005).

При изучении вещественного состава рудной акцессорной минерализации в аншлифах, изготовленных из образцов средне-густовкрапленных хромититов Агардагского массива, автором были диагностированы микроскопические включения минералов платиновой группы (ЭПГ). В работе приводятся химическая типизация выявленных минералов ЭПГ и предполагаются условия и механизмы их образования. Отражена естественная обстановка нахождения установленной платинометаллической минерализации в породообразующей матрице.

Методы исследования. В соответствии с задачами настоящего исследования был использован традиционный подход минераграфического изучения рудных минералов с определением химического состава фаз рентгеновским микроанализом, с применением метода растровой электронной микроскопии. Использовалась аппаратура: электронные микроскопы Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным детектором Ultim-Max100 (Oxford Instruments), Tescan Vega II LMU с энергодисперсионной (с детектором Si(Li) Standard) INCA Energy 350 и волнодисперсионной INCA Wave 700 приставками. Перед исследованием из отобранных образцов хромититов были изготовлены плоскопараллельные аншлифы толщиной 4–5 мм, с последующим напылением на их изучаемые поверхности слоя углерода толщиной 25–30 нм. Измерения проводились на вольфрамовом катоде при ускоряющем напряжении 20 кВ, текущем токе 15 нА и времени набора спектра 120 с. Диаметр пучка зонда 1–2 мкм. В качестве стандартов для Ru, Os, Ir, Rh, Ni, Fe и Sb были применены чистые металлы, для S – пирит, для As – сперилит. Использованы аналитические линии: $L\alpha$ для Ru, Ir, Rh, Sb; $K\alpha$ для S, Fe, Ni, As; $M\alpha$ для Os.

Все анализы выполнены в ЦКП “Аналитический центр геохимии природных систем” ТГУ (г. Томск), аналитик Е.В. Корбояк.

Распределение минералов ЭПГ в породах массива. В Агардагском массиве минералы ЭПГ были изучены в хромититах со средне- до густовкрапленной структурой. Сливные хромититы не изучались в связи с отсутствием последних в коллекции автора. Образцы ультрамафитов с редкой вкрапленностью хромшпинелидов оказались “пустыми” в отношении минералов ЭПГ.

Хромшпинелиды по химическому составу соответствуют хромиту ($MgO = 10.7...13.6$ мас. %, $Al_2O_3 = 7.3...12.8$ мас. %, $Cr_2O_3 = 57.5...64.7$ мас. %) и алюмохромиту ($MgO = 12.1...14.9$ мас. %, $Al_2O_3 = 14.0...24.6$ мас. %, $Cr_2O_3 = 44.2...57.6$ мас. %) (рис. 1). Кроме хромшпинелидов в составе хромититов присутствуют серпентин и характерные для этого массива хромовые разновидности хлорита и граната – кеммерерит и уваровит. Последний обычно формирует тонкие прожилки, реже бесформенные пятна, заделывающая трещинки в хромшпинелидах (Юричев и др., 2018).

Минералы ЭПГ наблюдаются преимущественно в виде самостоятельных гексагональных и гипидиоморфных микроскопических выделений (1–6 мкм), главным образом, внутри зерен хромшпинелидов, значительно реже – в интерстициях между зернами силикатов.

По химическому составу диагностированные платиноиды подразделяются на три основные группы: самородные металлы и их природные сплавы (металлические твердые растворы (МТР) Os–Ir–Ru специализации, самородные рутений, иридий), сульфиды и сульфохарсениды. В составе всех выделенных групп отмечены в основном ми-

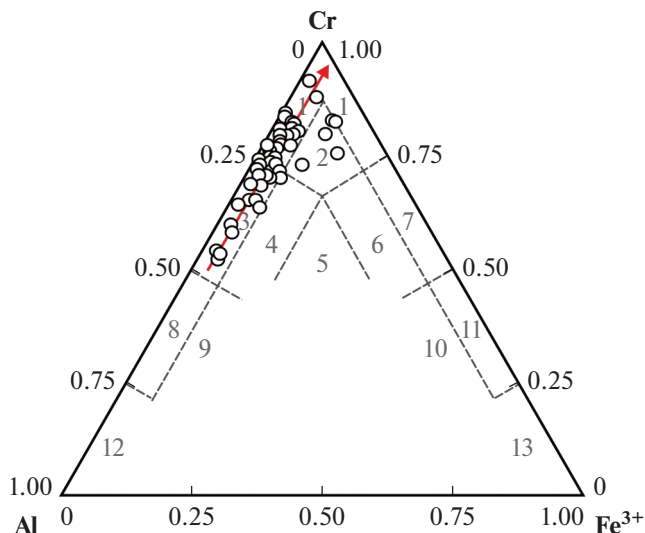


Рис. 1. Составы хромшпинелидов из хромититов Агардагского массива на классификационной диаграмме Н.В. Павлова (Павлов, 1949): 1) хромит; 2) субферрихромит; 3) алюмохромит; 4) субферриалюмохромит; 5) ферриалюмохромит; 6) субалюмоферрихромит; 7) феррихромит; 8) хромпикотит; 9) субферрихромпикотит; 10) субалюмохроммагнетит; 11) хроммагнетит; 12) пикотит; 13) магнетит.

Fig. 1. Compositions of chromspinelides from chromitites of the Agardag massif on classification diagram by N.V. Pavlov (Pavlov, 1949): 1) chromite; 2) subferrichromite; 3) aluminochromite; 4) subferrialuminochromite; 5) ferrialuminochromite; 6) subaluminoferrichromite; 7) ferrichromite; 8) chrompicotite; 9) subferrichrompicotite; 10) subalumochromomagnetite; 11) chromomagnetite; 12) picotite; 13) magnetite.

нералы тугоплавких ЭПГ (Ir, Os, Ru). Минералы платиновой триады представлены только сульфоарсенидом родия – холлингвортитом (RhAsS). Платина и палладий не выявлены ни в виде самостоятельных минералов, ни в виде примеси в других минералах.

Минеральные формы ЭПГ и особенности их химического состава. *Самородные металлы и их природные сплавы.* Данная группа представлена самородными рутением и иридием, МТР системы Os–Ir–Ru и фазой Ru–Ir.

Самородный рутений изучен на примере нескольких самостоятельных губчатых, преимущественно дезинтегрированных на ряд сегментов выделений в основной силикатной матрице между зерен хромшпинелидов (рис. 2, а). Выделения минерала характеризуются гипидиоморфным обликом и достигают размера 6 мкм. В его химическом составе постоянно отмечаются незначительные примеси никеля (до 1.6 мас. %) и железа (до 0.4 мас. %) (табл. 1). В одном из зерен самородного рутения выявлено микроскопическое включение МТР Os–Ir–Ru специализации, однако из-за незначительных его размеров диагностика выполнена только качественно (рис. 2, а; ан. 22, табл. 1).

Также единожды в хроммагнетите обнаружено зерно рутений-железистого состава (рис. 2, б; ан. 5-1, 5-2, табл. 1) в ассоциации с сульфидом такого же состава (рис. 2, б; ан. 8-1, 8-2, табл. 2). Исключение из полученных химических составов железа позволяет рассчитать почти стехиометрические составы самородного рутения и лаурита. В пользу выделения данных минералов также выступает близость формы их кристаллов и интенсивности отражения электронов (режим BSE) диагностированным самородному рутению и лауриду. Интенсивное заражение химического состава железом свя-

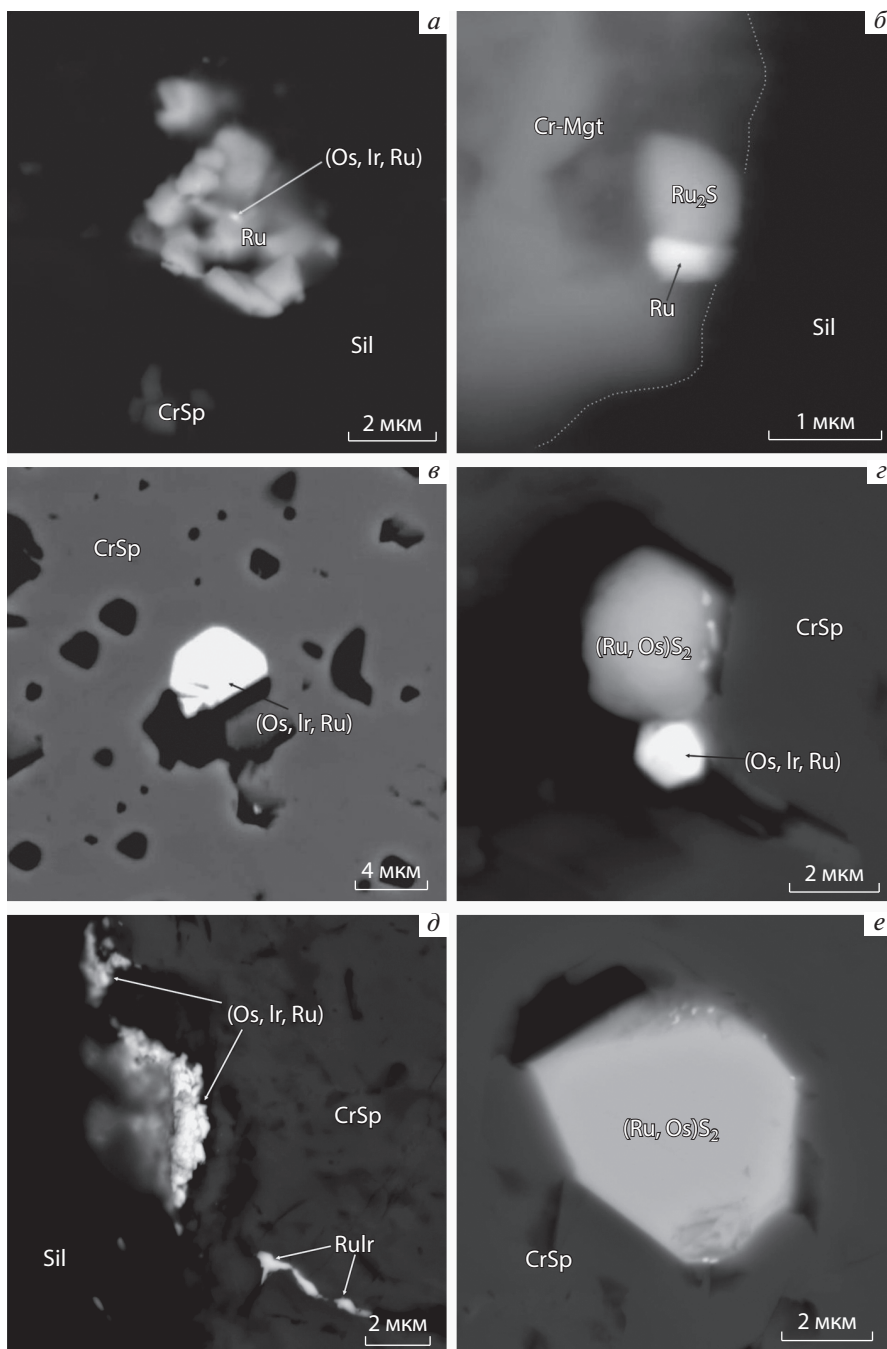


Рис. 2. Акцессорная платинометальная минерализация из средне-густовкрапленных хромититов Агардагского ультрамафитового массива (микрофотографии в режиме отраженных электронов): *a* – губчатое выделение самородного рутения (ан. 1, табл. 1) с микроскопическим включением МТР Os–Ir–Ru специализации (ан. 22, табл. 1), в силикатной матрице; *b* – включения самородного рутения (ан. 5-1, 5-2, табл. 1) и лаурита (ан. 8-1, 8-2, табл. 2) в зерне хроммагнетита; *в* – правильное зерно рутениридосмина (ан. 14, табл. 1) в алюмохромите; *г* – включения иридосмина (ан. 17, табл. 1) и лаурита (ан. 6, табл. 2) в зерне алюмохромита; *д* – включения губчатого рутениридосмина (ан. 16, табл. 1) и рутениридия (ан. 9–10, табл. 1) в хромите; *е* – правильное зерно лаурита (ан. 1, табл. 2), капсулированное в алюмохромите. Здесь и далее: *CrSp* – хромшпинелид; *Sil* – силикатная матрица.

Fig. 2. Accessory platinum–metal mineralization from medium-disseminated and densely chromitites of the Agardag ultramafic massif (microphotographs in BSE mode): *a* – spongy grain of native ruthenium (an. 1, Table 1) with microscopic inclusions of metallic solid solutions Os–Ir–Ru specialization (an. 22, Table 1), in a silicate matrix; *b* – inclusions of native ruthenium (an. 5-1, 5-2, Table 1) and laurite (an. 8-1, 8-2, Table 2) in a grain of chrommagnetite; *в* – regular grain of ruteniridosmine (an. 14, Table 1) in aluminochromite; *г* – inclusions of iridosmine (an. 17, Table 1) and laurite (an. 6, Table 2) in a grain of aluminochromite; *д* – inclusions of spongy rutheniridosmine (an. 16, Table 1) and rutheniridium (an. 9–10, Table 1) in chromite; *е* – regular laurite grain (an. 1, Table 2) encapsulated in aluminochromite. Hereinafter: *CrSp* – chromspinelide; *Sil* – silicate matrix.

зывается автором с малыми размерами выделений (~1 мкм), их полным капсулированием в зерне хроммагнетита, а также вероятной тонкодисперсной механической примесью хроммагнетита в составе диагностируемых платиноидов.

Самородный иридий редок. Из-за микроскопических размеров (до 1.2 мкм) и частого формирования полифазных (с ирарситом, реже – с ирарситом и хизлевудитом) включений в интерстициях зерен силикатов он диагностирован только качественно (рис. 3, *б*; ан. 6–8, табл. 1). Зерна в основном округлой формы, по интенсивности отражения электронов совпадают с МТР Os–Ir–Ru специализации. В химическом составе минерала постоянно обнаруживаются примеси рутения, никеля и железа.

Твердые растворы Os–Ir–Ru являются обычными для рестиновых ультрамафитов и хромититов офиолитовых комплексов. Наряду с дисульфидами лаурит–эрлихманитового ряда они представлены достаточно широко в изученных хромититах. Следует отметить, что наибольшее их количество установлено в образцах, в которых отмечается кеммерерит и уваровит. Твердые растворы Os–Ir–Ru локализованы преимущественно внутри зерен хромшпинелидов и характеризуются высокой степенью идиоморфизма, нередко с формированием шестигранников (рис. 2, *в–г*). Размер таких выделений не превышает 5 мкм. Химический состав главным образом соответствует иридосмину и рутениридосмину. Преимущественно МТР Os–Ir–Ru формируют самостоятельные правильные по форме единичные зерна, нередко в тесной ассоциации с лауритом (рис. 2, *в–г*), реже – микроскопические включения в неправильных выделениях мышьяксодержащего лаурита, капсулированного в хромшпинелиде (рис. 3, *а*), или самородном рутении из интерстиций зерен силикатов (рис. 2, *а*). В качестве примесей в химическом составе нередко обнаруживаются никель (до 0.8 мас. %) и железо (до 1.0 мас. %) (табл. 1).

Рутениридий (RuIr) редок. Формирует тонкие прожилки, залечивающие трещинки в зернах хромшпинелидов (рис. 2, *д*). Часто в виде включений в таких зернах хромшпинели также обнаруживаются МТР Os–Ir–Ru губчатой структуры. В связи с малыми размерами выделений и их полным включением в матрицу хромита, состав рутениридия “загрязнен” хромом и железом (табл. 1). Расчет кристаллохимической формулы выполнен на основе суммарного химического состава изучаемого минерала и вмещающего его хромита, путем полного исключения из состава хрома и железа. Ранее близкий по кристаллохимическому составу рутениридий (фаза Ru–Ir) был выделен в Гулинском щелочно-ультрасосновном массиве (Полярная Сибирь) (Жогарко, Сенин,

Таблица 1. Химический состав (мас. %) минералов ЭПГ (самородные металлы и их природные сплавы) из хромититов Агардагского массива
Table 1. Chemical composition (wt %) of PGE minerals (native metals and their natural alloys) from chromitites of the Agardag massif

№ п/п	Ru	Os	Ir	Rh	Ni	Fe	Cr	S	As	Всего	Кристаллохимическая формула	Форма нахождения
Самородный Ru												
1	98.27	—	—	—	1.61	0.34	—	—	—	100.22	Ru _{0,97} Ni _{0,02} Fe _{0,01}	Индивидуальные зерна в силикатной матрице
2	98.19	—	—	—	0.92	0.37	—	—	—	99.48	Ru _{0,97} Ni _{0,02} Fe _{0,01}	
3	98.73	—	—	—	1.17	0.22	—	—	—	100.12	Ru _{0,98} Ni _{0,02}	
4	97.81	—	—	—	1.07	0.30	—	—	—	99.18	Ru _{0,97} Ni _{0,02} Fe _{0,01}	
5-1**	50.02	—	—	1.93	1.45	42.38	4.09	—	—	99.87	Ru _{0,93} Ni _{0,05} Rh _{0,03}	
5-2**	50.64	—	—	2.28	1.33	41.33	4.27	—	—	99.85	Ru _{0,92} Ni _{0,04} Rh _{0,04}	
Самородный Ir												
6*	1.92	—	89.11	—	0.74	2.13	—	3.24	2.95	100.09		Полифазные (с иррицитом) включения в силикатной матрице
7*	3.41	—	90.36	—	1.29	1.53	—	0.72	1.89	99.20		
8*	2.10	—	89.49	—	1.69	1.72	—	2.16	2.61	99.77		
RuIr												
9**	30.31	—	43.56	—	1.69	5.94	18.28	—	—	99.78	Ru _{1,08} (Ir _{0,82} Ni _{0,10}) _{0,92}	Включения неправильной формы в хромититовых неле
10**	29.63	—	42.70	—	1.42	6.31	19.45	—	—	99.51	Ru _{1,09} (Ir _{0,82} Ni _{0,09}) _{0,91}	
11**	25.24	—	42.53	—	0.63	7.36	23.09	—	—	98.85	Ru _{1,04} (Ir _{0,92} Ni _{0,04}) _{0,96}	
Металлические твердые растворы Os—Ir—Ru												
12	9.41	50.63	38.00	—	—	0.50	—	—	—	98.54	Os _{0,47} Ir _{0,35} Ru _{0,16} Fe _{0,02}	Индивидуальные включения в хромититовых неле
13	7.39	54.06	38.20	—	—	0.50	—	—	—	100.15	Os _{0,50} Ir _{0,35} Ru _{0,13} Fe _{0,02}	
14	9.17	77.35	12.54	—	0.51	—	—	—	—	99.57	Os _{0,71} Ru _{0,16} Ir _{0,11} Ni _{0,02}	
15	18.63	57.96	22.07	—	0.76	—	—	—	—	99.42	Os _{0,49} Ru _{0,30} Ir _{0,19} Ni _{0,02}	
16	21.20	57.15	20.80	—	0.77	0.24	—	—	—	100.16	Os _{0,47} Ru _{0,33} Ir _{0,17} Ni _{0,02} Fe _{0,01}	
17	7.53	51.86	39.17	—	—	0.15	—	—	—	98.71	Os _{0,49} Ir _{0,37} Ru _{0,14}	То же, но в парагенезисе с лаурицитом
18	9.44	52.33	37.31	—	—	0.40	—	—	—	99.48	Os _{0,48} Ir _{0,34} Ru _{0,17} Fe _{0,01}	
19*	23.33	33.82	19.12	—	0.65	0.98	—	20.91	0.76	99.58		Микровключения в мышьяксодержателем лауриците
20*	28.49	27.19	17.45	—	0.61	1.07	—	23.02	1.48	99.31		
21*	33.93	25.43	13.94	—	0.62	0.91	—	23.77	1.43	100.02		Микровключения в самородном рутении
22*	62.37	17.35	18.97	—	0.98	0.59	—	—	—	100.21		

Примечание. Здесь и далее: * — Из-за микроскопических размеров или полифазности минеральных выделений данные химического анализа представляют собой сумму составов изучаемого минерала и вмещающего его (контактирующего с ним) минерала. ** — в связи с малыми размерами включения идентификация фазы выполнена на основе суммарного химического состава изучаемого минерала и вмещающего его хромититовых неле, путем исключения из состава хрома и железа.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) сульфидов и сульфосарсенидов ЭПГ из хромитов Агардагского массива
Table 2. Chemical composition (wt %) of sulphides and sulphosarsenides of PGE from chromites of the Agardag massif

№ п/п	Ru	Os	Ir	Rh	Ni	Fe	Cr	S	As	Всего	Кристаллохимическая формула	Форма нахождения
Сульфиды лауриг-эрлихманитового ряда												
1	46.91	11.61	5.30	—	—	0.05	—	36.01	—	99.88	$(\text{Ru}_{0.83}\text{Os}_{0.11}\text{Ir}_{0.05})_{0.99}\text{S}_{2.01}$	Индивидуальные зерна в хромшпиннели
2	46.33	11.38	4.99	—	—	—	—	35.93	—	98.63	$(\text{Ru}_{0.82}\text{Os}_{0.11}\text{Ir}_{0.05})_{0.98}\text{S}_{2.02}$	
3	33.06	21.68	11.93	—	—	0.10	—	32.69	—	99.46	$(\text{Ru}_{0.64}\text{Os}_{0.23}\text{Ir}_{0.12})_{0.99}\text{S}_{2.01}$	
4	46.87	11.68	5.48	—	—	—	—	36.19	—	100.21	$(\text{Ru}_{0.82}\text{Os}_{0.11}\text{Ir}_{0.05})_{0.98}\text{S}_{2.02}$	
5	41.46	20.97	2.33	—	—	—	—	35.22	—	99.97	$(\text{Ru}_{0.75}\text{Os}_{0.20}\text{Ir}_{0.02})_{0.97}\text{S}_{2.03}$	То же, но в паратенезисе с иридосмином
6	41.87	20.01	2.72	—	—	—	—	34.55	—	99.15	$(\text{Ru}_{0.77}\text{Os}_{0.20}\text{Ir}_{0.03})_{1.00}\text{S}_{2.00}$	
7	42.91	19.10	2.77	—	—	—	—	34.69	—	99.47	$(\text{Ru}_{0.78}\text{Os}_{0.19}\text{Ir}_{0.03})_{1.00}\text{S}_{2.00}$	
8-1**	27.92	—	—	—	0.73	48.77	4.31	18.04	—	99.77	$(\text{Ru}_{0.98}\text{Ni}_{0.04})_{1.02}\text{S}_{1.98}$	Включения в хроммагне-тите, в паратенезисе с са-мородным рутением
8-2**	29.80	—	—	—	0.90	46.35	4.28	18.85	—	100.19	$(\text{Ru}_{1.00}\text{Ni}_{0.05})_{1.05}\text{S}_{1.95}$	
Мышькосоержащие минералы системы лауриг-эрлихманит												
9	48.64	5.25	8.20	—	0.57	0.58	—	34.75	2.19	100.17	$(\text{Ru}_{0.86}\text{Ir}_{0.08}\text{Os}_{0.05}\text{Fe}_{0.02}\text{Ni}_{0.02})_{1.03}(\text{S}_{1.92}\text{As}_{0.05})_{1.97}$	Включения неправильной формы в хромшпиннели
10	46.77	4.91	9.60	—	0.57	0.66	—	34.07	2.76	99.34	$(\text{Ru}_{0.84}\text{Ir}_{0.09}\text{Os}_{0.05}\text{Fe}_{0.02}\text{Ni}_{0.02})_{1.02}(\text{S}_{1.92}\text{As}_{0.06})_{1.98}$	
11	49.17	4.45	7.82	—	0.69	0.76	—	34.61	2.11	99.6	$(\text{Ru}_{0.88}\text{Ir}_{0.07}\text{Os}_{0.04}\text{Fe}_{0.02}\text{Ni}_{0.02})_{1.03}(\text{S}_{1.92}\text{As}_{0.05})_{1.97}$	
12	39.88	4.79	15.96	—	0.67	1.33	—	29.79	6.10	98.52	$(\text{Ru}_{0.78}\text{Ir}_{0.16}\text{Os}_{0.05}\text{Fe}_{0.05}\text{Ni}_{0.02})_{1.06}(\text{S}_{1.78}\text{As}_{0.16})_{1.94}$	
13	35.43	6.20	21.12	—	0.65	1.35	—	28.55	6.62	99.92	$(\text{Ru}_{0.71}\text{Ir}_{0.22}\text{Os}_{0.07}\text{Fe}_{0.05}\text{Ni}_{0.02})_{1.07}(\text{S}_{1.75}\text{As}_{0.18})_{1.93}$	
14	35.89	5.97	20.90	—	0.58	1.15	—	28.68	7.03	100.21	$(\text{Ru}_{0.72}\text{Ir}_{0.22}\text{Os}_{0.06}\text{Fe}_{0.04}\text{Ni}_{0.02})_{1.06}(\text{S}_{1.75}\text{As}_{0.19})_{1.94}$	
Ирарсит*												
15	1.62	—	58.99	1.32	3.39	0.37	—	6.88	27.25	99.82	—	Включения (до 1 мкм) неправильной формы в силикатной матрице
16	1.89	—	57.18	0.87	3.34	0.41	—	6.38	29.22	99.30	—	
17	1.96	—	56.47	0.76	3.67	0.37	—	6.57	29.48	99.28	—	
18	2.02	—	64.78	—	0.85	0.56	—	10.81	19.85	98.87	—	Полифазные (с самородным иридием) включения в силикатной матрице
19	1.53	—	66.01	—	0.57	0.24	—	11.04	20.32	98.70	—	
20	1.87	—	63.54	—	1.06	0.60	—	11.38	21.25	99.71	—	
21	1.76	—	62.63	—	1.81	0.63	—	11.59	20.98	99.41	—	
Холлингвортит												
22	3.57	—	—	41.77	1.92	1.43	—	15.03	35.78	99.49	$(\text{Rh}_{0.86}\text{Ru}_{0.07}\text{Ni}_{0.07}\text{Fe}_{0.05})_{1.05}\text{As}_{1.00}\text{S}_{0.95}$	Выделения неправильной формы в интерстициях зерен силикатов между зерен хромшпиннели
23	2.87	—	—	42.66	1.51	0.61	—	15.44	36.01	99.11	$(\text{Rh}_{0.86}\text{Ru}_{0.06}\text{Ni}_{0.05}\text{Fe}_{0.02})_{0.99}\text{As}_{1.00}\text{S}_{1.01}$	
24	3.32	—	—	42.12	1.94	1.68	—	14.95	34.64	98.65	$(\text{Rh}_{0.88}\text{Ru}_{0.07}\text{Ni}_{0.07}\text{Fe}_{0.06})_{1.08}\text{As}_{1.00}\text{S}_{0.92}$	
25	1.33	—	—	41.85	0.60	2.58	—	13.81	39.99	100.16	$(\text{Rh}_{0.84}\text{Ru}_{0.03}\text{Ni}_{0.02}\text{Fe}_{0.10})_{0.99}\text{As}_{0.89}\text{S}_{1.12}$	
26	1.70	—	—	40.55	—	3.80	—	13.25	40.24	99.55	$(\text{Rh}_{0.83}\text{Ru}_{0.03}\text{Fe}_{0.14})_{1.00}\text{As}_{0.87}\text{S}_{1.13}$	

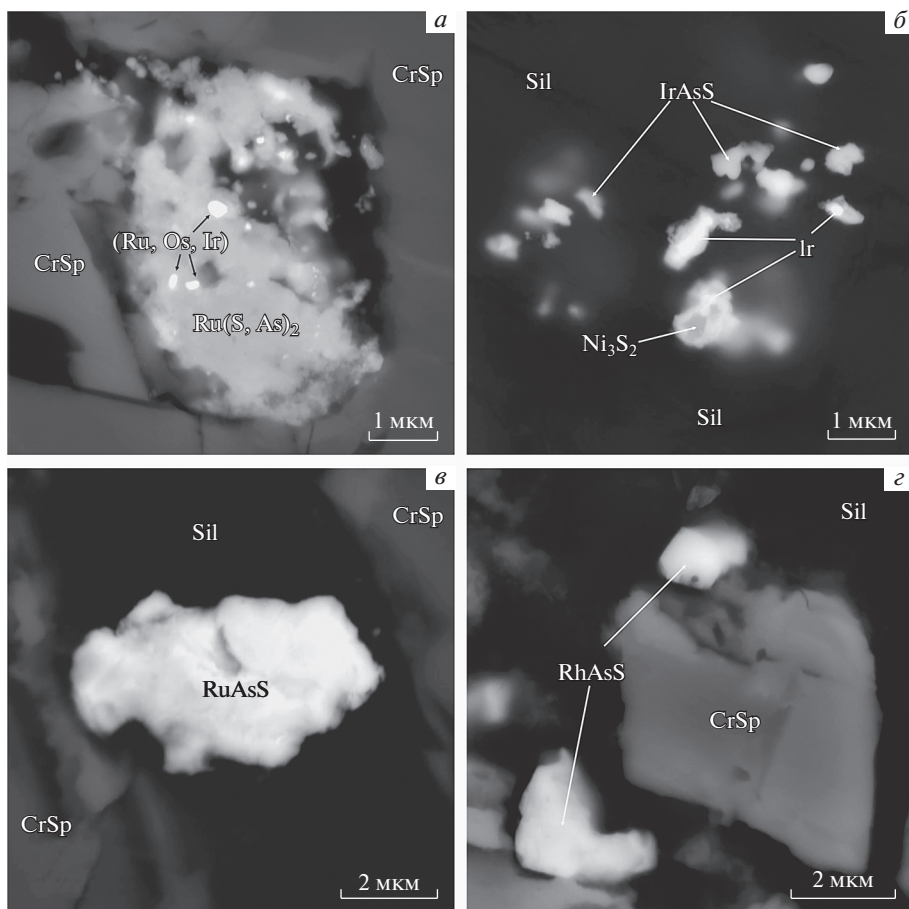


Рис. 3. Микрофотографии сульфидов и сульфоарсенидов ЭПГ в хромититах Агардагского массива (режим отраженных электронов): *а* – губчатое выделение мышьяксодержащего лаурита (ан. 9, табл. 2) с микроскопическим включением МТР Os–Ir–Ru специализации (ан. 19–21, табл. 1), в хромите; *б* – микроскопические полифазные (самородный иридий (ан. 6–8, табл. 1), ирарсит (ан. 18–21, табл. 2), хизлеудит) включения в силикатной матрице; *в* – губчатое зерно холлингвортита (ан. 22, табл. 2) в интерстициях зерен силикатов между зернами хромшпинели; *г* – включения холлингвортита (ан. 24–25, табл. 2) в интерстициях хромшпинели.

Fig. 3. Microphotographs of sulphides and sulphoarsenides of PGE from chromitites of the Agardag massif (BSE mode): *a* – spongy grain of arsenic-bearing laurite (an. 9, Table 2) with microscopic inclusions of Os–Ir–Ru metallic solid solutions (an. 19–21, Table 1), in chromite; *б* – microscopic polyphase (native iridium (an. 6–8, Table 1), irarsite (an. 18–21, Table 2), hazzlewoodite) inclusions in silicate matrix; *в* – spongy grain of hollingworthite (an. 22, Table 2) in interstices of grains of silicates between chromspinel grains; *г* – inclusions of hollingworthite (an. 24–25, Table 2) in chromspinel interstices.

2011) и Оспино-Китойском и Харанурском ультраосновных массивах Восточного Са-яна (Киселева и др., 2014).

Сульфиды ЭПГ распространены широко. Они отвечают кристаллохимической формуле MeS_2 и соответствуют сульфидам лаурит–эрлихманитового ряда. Отдельные зер-

на достигают размеров 6 мкм, часто характеризуются высокой степенью идиоморфизма с хорошо выраженными гранями. Минерал наблюдаются, главным образом, в виде включений в зернах хромшпинелидов, нередко в тесной ассоциации с твердыми растворами Os–Ir–Ru (рис. 2, *з*, *е*). Отмечено, что доминирующие в составе МТР Os–Ir–Ru осмий и иридий уступают ведущую роль в дисульфидах рутению. Химический состав последних преимущественно соответствует лауриту (RuS_2) и в основном “стерилен” в отношении примесей других металлов (табл. 2).

Сульфоарсениды ЭПГ. Данная группа по результатам рентгеноспектрального анализа подразделяется на 2 типа соединений. Первый тип соответствует мышьяксодержащим дисульфидам ЭПГ. Основная их особенность заключается в том, что в лигандной группировке часть серы замещена мышьяком (содержание As до 7.0 мас. %) и, таким образом, эта группа является переходной к достаточно распространенным собственно сульфоарсенидным фазам (табл. 2). Отличием от “чистых” дисульфидов также является возрастающая роль в химическом составе иридия (до 21.1 мас. %, выходит на второе место после рутения) при значительном уменьшении роли осмия (до 4.5 мас. %) и постоянном обнаружении примесей никеля и железа (до 0.7 и 1.3 мас. % соответственно). Мышьяксодержащие дисульфиды ЭПГ наблюдаются в виде неправильных выделений размером до 6 мкм внутри зерен хромшпинелидов. Нередко внутри них отмечаются микроскопические включения иридоосмирутена (рис. 3, *а*).

Ранее подобные мышьяксодержащие дисульфиды ЭПГ были выделены в хромитах Кемпирсайского (Южный Урал) и Харчерузского (Полярный Урал) ультрамафитовых массивов (Дистлер и др., 2003; Юричев и др., 2020).

Второй тип соответствует собственно сульфоарсенидам со стехиометрической формулой MeAsS , где в катионной группе доминируют иридий или родий при незначительном количестве рутения (до 3.2 мас. %) и полном отсутствии осмия. Автором здесь выделяются два минеральных вида: ирарсит (IrAsS) и холлингвортит (RhAsS).

Ирарсит отмечается как в виде сыпи микроскопических (до 0.8 мкм) неправильных зерен, так и в виде полифазных (до 1.2 мкм) сростков с самородным иридием или самородным иридием и хизлевудитом в силикатной матрице интерстиций зерен хромшпинелидов (рис. 3, *б*). В связи с этим диагностика минерала носит исключительно качественный характер, а химические составы представлены как сумма изучаемого минерала и контактирующего с ним минерала (табл. 2). Попытка расчета кристаллохимической формулы ирарсита показывает, что в его составе, в первую очередь, отмечается повышенное содержание иридиевого минала, очевидно, за счет присутствующего здесь же самородного иридия.

Холлингвортит обнаружен в виде самостоятельных обособленных выделений неправильной формы в интерстициях зерен силикатов между зернами хромшпинелидов. Размер таких зерен достигает 6 мкм (рис. 3, *в–г*). В химическом составе минерала постоянно диагностируются примеси рутения (до 3.6 мас. %), никеля (до 1.9 мас. %) и железа (до 3.8 мас. %) (табл. 2). При этом отмечено, что если самостоятельные зерна ирарсита содержат незначительную примесь родия (ан. 15–17, табл. 2), то в составе холлингвортитов иридий не выявлен.

О генезисе платиноидной минерализации. В разномасштабных хромитовых проявлениях в ультрамафитовых массивах различных регионов мира практически всегда присутствует акцессорная минерализация ЭПГ. При этом наблюдается неравномерность проявления платиноидов со значительными колебаниями концентраций разных металлов. Все шесть металлов платиновой группы ведут себя в ультраосновных расплавах по-разному, что, очевидно, связано с различием их физико-химических свойств. Активность платиноидов возрастает в ряду $\text{Os} < \text{Ru} < \text{Ir} < \text{Pt} < \text{Pd}$, что происходит одновременно с переходом от высокотемпературных к низкотемпературным ассоциациям породообразующих силикатов по мере остывания расплава. Фазы Os–Ir–Ru–Pt и

Pt–Fe близки к мантийному распределению, а Pt–Pd–(Au) ассоциация свойственна ко-ровым условиям рудогенеза (Гурская и др., 2004; Киселева и др., 2014).

Известно, что при высоких температурах и давлениях платиноиды в силикатных магматических расплавах проявляют исключительно сидерофильные свойства, при этом они генетически связаны с железо-магнезиальными силикатными минералами (Kennedy et al., 1993). Лишь при появлении в расплаве достаточного количества серы платиноиды начинают проявлять халькофильные тенденции с образованием сульфидных минералов. Отсюда преобладающая первоначальная форма нахождения платиноидов в магматическом расплаве – микрокомпонентная, связанная с силикатами и оксидами хрома. При этом кристаллохимические исследования (Маракушев и др., 1998) показали, что среди кристаллизующихся минералов наиболее благоприятными для вхождения платиновых металлов являются хромшпинелиды. В настоящее время такая пространственная и сингенетическая связь является общепризнанной (Талхаммер, 1996; Zhou et al., 1996; Melcher et al., 1997; Пушкарев и др., 2007; Юричев и др., 2020; Yurichev, Chernyshov, 2020).

По химическому составу выявленные в составе агардагских хромититов платиноиды подразделяются на три основные группы: самородные металлы и их сплавы, сульфиды и сульфоарсениды, которые характеризуются Os–Ir–Ru специализацией. Исключением является легкоплавкий платиноид родий, который отмечен в виде самостоятельного минерала – холлингвортита.

Обнаруженные в составе зерен хромшпинелидов МТР Os–Ir–Ru состава, очевидно, являются первичными, наиболее высокотемпературными образованиями мантийного происхождения. Известно, что при высоких температурах растворимость иридия в осмии достигает 44 мас. % и Os, Ir и Ru образуют ряд твердых растворов с ограниченной смесимостью (Благородные металлы..., 1984). В мантийных высокобарических условиях первым кристаллизуется иридий осмий и ирийдосмин, расплав и твердые фазы насыщаются рутением (Bird, Bassett, 1980; Дистлер и др., 1986; Tolstykh et al., 2002). Данные выводы находят подтверждение в изученных МТР, где отмечается изменение химического состава от ирийдосмина к рутениридосмину (табл. 1).

Выделенные дисульфиды лаурит–эрлихманитового ряда, соответствующие по составу преимущественно лауриту, автор также склонен относить к ранним образованиям, сингенетичным с хромшпинелидами. Этот вывод помимо литературных данных (Гурская и др., 2004; Киселева и др., 2014) находит подтверждение в исключительном обнаружении дисульфида только в виде включений в хромшпинелиде и высокой степени идиоморфизма его зерен. Формирование минерала, очевидно, происходило в результате воздействия содержащейся в остаточном расплаве серы на высокотемпературные ассоциации МТР.

Остальные диагностированные минералы ЭПГ можно связать с более поздними событиями преобразования первичных МТР системы Os–Ir–Ru и дисульфидов лаурит–эрлихманитового ряда. Эти события, вероятно, могли быть вызваны мантийным метасоматозом, когда при воздействии восстановленных флюидов мантийного происхождения происходили процессы ремобилизации и переотложения ЭПГ (Garuti, Zaccarini, 1997; Melcher et al., 1997; Ahmed, Arai, 2003; Киселева и др., 2014; Юричев и др., 2021).

Формирование выделенной ассоциации платиноидов, очевидно, происходило в несколько этапов. Образование рутенийиридия (фаза Ru–Ir), с учетом высокой температуры плавления интерметаллидов, связано с более высокими температурами формирования. Несколько более позднее формирование мышьяксодержащих дисульфидов и собственно сульфоарсенидов происходило в процессе повышения активности мышьяка в системе, в результате его привноса восстановленными флюидами.

Проблема образования самородных иридия и рутения не столь однозначна. Экспериментальные и литературные данные (Горбачев и др., 1993; Дистлер и др., 2003)

указывают на то, что эти фазы устойчивы в широком диапазоне физико-химических параметров, при этом их образование может происходить под воздействием восстановленных флюидных потоков как в самом магматическом расплаве, так и после его кристаллизации. Образование выделенных самородных платиноидов совместно с формированием ассоциирующего с ними аваруита (Ni_3Fe) связывается автором с реакциями десульфуризации в процессе серпентинизации хромититов и вмещающих их реститовых ультрамафитов (Stockman, Hlava, 1984; Гурская и др., 2004; El Ghorfi et al., 2008). В пользу такого предположения свидетельствует постоянное присутствие в хромититах акцессорной вкрапленности халькозина и герсдорфита, а также губчатая структура платиноидов, которая рассматривается как вторичная (Толстых, 2018).

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования позволили впервые диагностировать микроскопические включения минералов ЭПГ в естественной обстановке нахождения. Ранее платиноиды в хромититах Агардагского массива были обнаружены путем измельчения проб до пудры (менее 50 мкм), получения из нее через промывку искусственного шлиха тяжелой фракции с дальнейшим приготовлением из концентрата препарата и его изучения на сканирующем электронном микроскопе (Агафонов и др., 1993). В процессе таких исследований предшественниками были отмечены самородный рутений и МТР системы Os–Ir–Ru. В ходе настоящего исследования впервые выявлены самородный иридий, рутениридий, сульфиды лаурит–эрлихманитового ряда и их мышьяксодержащие аналоги, ирарсит и холлингвортит.

2. Выявленные группы минералов ЭПГ характеризуются Os–Ir–Ru специализацией. Исключением является только легкоплавкий платиноид родия, который отмечен в виде самостоятельного минерала – холлингвортита. Платина и палладий не обнаружены ни в виде самостоятельных минералов, ни в виде примеси в других минералах.

3. Ведущая роль в Агардагском массиве в составе МТР осмия, очевидно, свидетельствует о его наиболее ранней мобилизации из “материнского” леерцолитового субстрата. Однако уже в сульфидах доминирующие позиции занимает рутений, который, в свою очередь, в сульфоарсенидах уступает это место иридию и родию.

4. Дисульфиды ряда лаурит–эрлихманит образуют практически непрерывный изоморфный ряд с преобладанием рутениевого минерала и “сквозным” присутствием иридия (с содержанием до 11.9 мас. %). Отдельную группу составляют мышьяксодержащие минералы. Если “чистые” дисульфиды в основном “стерильны” в отношении цветных металлов, то их мышьяксодержащие аналоги характеризуются возрастающей ролью в химическом составе иридия (до 21.1 мас. %, выходит на второе место после рутения) при значительном уменьшении содержания осмия (до 6.2 мас. %) и постоянном наличии примесей никеля и железа (до 0.7 и 1.3 мас. % соответственно).

5. Сульфоарсениды ЭПГ обнаруживают тенденцию, направленную на фракционирование в основном иридия и родия. При этом рутений отмечается ограничено (до 3.2 мас. %), а осмий отсутствует полностью. Отмечено, что если самостоятельные зерна ирарсита содержат незначительную примесь родия, то в составе холлингвортита иридий не выявлен.

6. Главным фактором формирования платиноидной минерализации является флюидная мобилизация, концентрирование и отложение минералов ЭПГ. При этом предполагается, что процесс формирования ассоциации выявленных минералов ЭПГ происходил в несколько этапов. Наиболее ранними являются МТР Os–Ir–Ru и дисульфиды лаурит–эрлихманитового ряда. Остальные выявленные в настоящей работе минералы ЭПГ связаны с более поздними событиями изменения первичных минералов, вызванных воздействием восстановленных мантийных флюидов, способствовавших процессам ремобилизации и переотложения ЭПГ. Образование выделенных са-

мородных рутения и иридия обусловлено реакциями десульфуризации в процессе серпентинизации хромититов и вмещающих их реститовых ультрамафитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонов Л.В., Кужугет К.С., Ойдуп Ч.К., Ступаков С.И.* Самородные металлы в гипербазитах Тувы. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, **1993**. 88 с.
- Агафонов Л.В., Лхамсүрэн Ж., Кужугет К.С., Ойдуп Ч.К.* Платиноносность ультрамафит-мафитов Монголии и Тувы. Улаанбаатар: Монгольский государственный университет науки и технологии, **2005**. 224 с.
- Благородные металлы.* Справочник / Ред. Савицкий Е.М. М.: Металлургия, **1984**. 592 с.
- Гончаренко А.И.* Деформация и петроструктурная эволюция альпинотипных гипербазитов. Томск: Изд-во Том. ун-та, **1989**. 404 с.
- Горбачев Н.С., Брузманн Г.Е., Налдретт А.Дж., Ходоровская Л.И., Азиф М.* Окислительно-восстановительные условия и распределение платиновых металлов в сульфидно-силикатных магматических системах // ДАН СССР. **1993**. Т. 331. № 2. С. 220–223.
- Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Шахова С.Н.* Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала. СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, **2004**. 306 с.
- Дистлер В.В., Крячко В.В., Лапутина И.П.* Эволюция парагенезиса платиновых металлов в альпинотипных гипербазитах // Геология рудных месторождений. **1986**. № 5. С. 16–33.
- Дистлер В.В., Крячко В.В., Юдовская М.А.* Условия образования оруденения платиновых металлов в хромитовых рудах Кемпирсайского рудного поля // Геология рудных месторождений. **2003**. Т. 45. № 1. С. 44–74.
- Киселева О.Н., Жмодик С.М., Дамдинов Б.Б., Агафонов Л.В., Белянин Д.К.* Состав и эволюция платинометалльной минерализации в хромитовых рудах Ильчирского офиолитового комплекса (Оспино-Китойский и Харанурский массивы, Восточный Саян) // Геология и геофизика. **2014**. Т. 55. № 2. С. 333–349.
- Когарко Л.Н., Сенин В.Г.* Первая находка золота в коренных породах Гулинского массива (Полярная Сибирь) // Доклады Академии наук. **2011**. Т. 441. № 1. С. 81–82.
- Козаков И.К., Ковач В.П., Ярмолук В.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Загорная Н.Ю.* Коробразующие процессы в геологическом развитии Тувино-Монгольского массива: Sm-Nd изотопные и геохимические данные по гранитоидам // Петрология. **2003**. Т. 11. № 5. С. 491–511.
- Маракушев А.А., Панеях Н.А., Русинов В.Л.* Петрологические модели формирования рудных месторождений-гигантов // Геология рудных месторождений. **1998**. Т. 40. № 3. С. 236–255.
- Павлов Н.В.* Химический состав хромшпинелидов в связи с петрографическим составом пород ультраосновных интрузивов // Труды Геологического института РАН. **1949**. Вып. 103. С. 1–91.
- Пешков А.А., Чернышов А.И., Бестемьянова К.В.* Минералогические особенности ультрамафитов Агардагского массива (Юго-Восточная Тыва) // Геосферные исследования. **2021**. № 1. С. 33–48.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф.* Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. **2007**. № 3. С. 28–65.
- Талхаммер Т.В.* Ассоциации минералов платиновой группы в массивных хромитовых рудах Кемпирсайского офиолитового комплекса (Южный Урал) как проявление мантийного метасоматоза // ЗВМО. **1996**. № 1. С. 25–36.
- Толстых Н.Д.* Платиновая минерализация массивов Кондер и Инагли // Геосферные исследования. **2018**. № 1. С. 17–32.
- Юричев А.Н., Розенбуш А.А., Кульков А.С.* Уваровит из хромититов Агардагского ультрамафитового массива (Республика Тыва): химизм и вопросы генезиса // ЗРМО. **2018**. Т. 147. № 1. С. 100–111.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В.* Платиноносность хромититов Харчерузского ультрамафитового массива (Полярный Урал): новые данные // ЗРМО. **2020**. Т. 149. № 3. С. 38–53.
- Юричев А.Н., Чернышов А.И., Корбовяк Е.В.* Первые находки минералов платиновой группы в ультрамафитах Кызыр-Бурлюкского массива (Западный Саян) // ЗРМО. **2021**. Ч. CL. № 4. С. 77–91.
- 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.

**Platinum Group Minerals in Chromitites of the Agardag Ultramafic Massif
(Republic of Tyva): New Data**

A. N. Yurichev*

Tomsk State University, Tomsk, 634050 Russia

**e-mail: juratur@sibmail.com*

In medium- and densely disseminated chromitites of the Agardag ultramafic massif, which is part of the South-Tuva ophiolite belt and is one of the largest massifs in Tyva, fine minerals of platinum group elements (PGE) were discovered for the first time. By chemical composition they are divided into three main groups: native metals and their natural alloys (metallic solid solutions Os–Ir–Ru, rutheniridium), disulphides of laurite–erlichmanite series and sulphoarsenides (irarsite, hollingworthite). The revealed groups of PGE minerals are characterized by the Os–Ir–Ru specialization. The only exception is fusible platinoid – rhodium, which is noted as independent mineral variety – rhodium sulfoarsenide. Platinum and palladium have not been found either as independent minerals or as minor elements in other minerals. The leading role in the composition of metallic solid solutions of osmium obviously indicates significant participation of this element in early parageneses and its earliest mobilization from the “parent” lherzolite substrate. However, ruthenium already dominates in sulfides, which, in turn, gives way to iridium and rhodium in sulfoarsenides. The process of forming assemblages of identified PGE minerals occurred in several stages. Earliest are metallic solid solutions of Os–Ir–Ru and disulfides of laurite–erlichmanite series. The rest of identified PGE minerals belong to later formations and associated with processes of mantle-crustal metasomatism, when under influence of reduced fluids processes of remobilization and reprecipitation of PGE are occurred.

Keywords: Republic of Tyva, ophiolites, Agardag massif, restite ultramafites, PGE minerals, chemical composition, genesis

REFERENCES

- Agafonov L.V., Kuzhuget K.S., Oidup Ch.K., Stupakov S.I.* Native metals in ultrabasites of Tuva. Novosibirsk, **1993**. 88 p. (in Russian).
- Agafonov L.V., Lkhamsuren J., Kuzhuget K.S., Oidup Ch.K.* Platinum-group element mineralization of ultramafic-mafic rocks in Mongolia and Tuva. Ulaanbaatar: Mongolian State University of Science and Technology, **2005**. 224 p. (in Russian).
- Ahmed A.H., Arai S.* Platinum-group minerals in podiform chromitites of the Oman ophiolite. *Canad. Miner.* **2003**. Vol. 41. P. 597–616.
- Bird J.M., Bassett W.A.* Evidence of deep mantle history in terrestrial osmium-iridium-ruthenium alloys. *J. Geophys. Res.* **1980**. Vol. 85. P. 5461–5470.
- Distler V.V., Kryachko V.V., Laputina I.P.* Evolution of PGE paragenesis in Alpine-type hyperbasites. *Geol. Ore Deposits.* **1986**. N. 5. P. 16–33 (in Russian).
- Distler V.V., Kryachko V.V., Yudovskaya M.A.* Formation conditions of platinum-group metals in chromite ores of the Kempirsai ore field. *Geol. Ore Deposits.* **2003**. Vol. 45. N 1. P. 37–65.
- El Ghorfi M., Melcher F., Oberthur T., El Boukhari A., Maacha L., Maddi A., Mhaili M.* Platinum group minerals in podiform chromitites of the Bou Azzer ophiolite, Anti Atlas, Central Morocco. *Miner. Petrol.* **2008**. Vol. 92. P. 59–80.
- Garuti G., Zaccarini F.* In situ alteration of platinum-group minerals at low temperature: evidence from serpentinized and weathered chromitites of the Vourinos Complex, Greece. *Canad. Miner.* **1997**. Vol. 35. P. 611–626.
- Goncharenko A.I.* Deformation and petrostructural evolution of alpine-type ultramafic rocks. Tomsk: Publishing House of Tomsk University, **1989**. 404 p. (in Russian).
- Gorbachev N.S., Brugmann G.E., Naldrett A.J., Khodorevskaya L.I., Azif M.* Redox conditions and distribution of platinum metals in sulfide-silicate magmatic systems. *Doklady USSR Acad. Sci.* **1993**. Vol. 331. N. 2. P. 220–223 (in Russian).
- Gurskaya L.I., Smelova L.V., Kolbantsev L.R., Lyakhnitskaya V.D., Lyakhnitsky Yu.S., Shakhova S.N.* Platinoids of chromite-bearing massifs of the Polar Urals. Saint Petersburg: VSEGEI, **2004**. 306 p. (in Russian).

Kennedy A.K., Lofgren G.F., Wasserburg G.J. An experimental study of trace element partitioning between olivine, orthopyroxene and melt in chondrules: equilibrium values and kinetic effects. *Earth Planet. Sci. Lett.* **1993**. Vol. 115. N 1/4. P. 177–195.

Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., Agafonov L.V., Belyanin D.K., Damdinov B.B. Composition and evolution of PGE mineralization in chromite ores from the Il'chir ophiolite complex (Ospa-Kitoi and Kharanur areas, East Sayan). *Russian Geol. Geophys.* **2014**. Vol. 55. N 2. P. 259–272.

Kogarko L.N., Senin V.G. The first find of native gold in parent rocks of the Gulinskii massif (Polar Siberia). *Doklady Earth Sci.* **2011**. Vol. 441. N 1. P. 1512–1513.

Kozakov I.K., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Zagornaya N.Yu. Crust-forming processes in the geologic development of the Tuva-Mongolia massif: Sm-Nd isotopic and geochemical data for granitoids. *Petrology.* **2003**. Vol. 11. N 5. P. 444–463.

Marakushev A.A., Paneyakh N.A., Rusinov V.L. Petrological models of formation of giant ore deposits. *Geol. Ore Deposits.* **1998**. Vol. 40. N 3. P. 211–227.

Melcher F., Grum W., Simon G., Thalhammer T.V., Stumpf E.F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite. *J. Petrol.* **1997**. Vol. 38. P. 1419–1458.

Noble metals. Handbook. Ed. by Savitsky E.M. Moscow: Metallurgiya, **1984**. 592 p. (in Russian).

Pavlov N.V. Chemical composition of chromospinelides in connection with the petrographic composition of rocks of ultrabasic intrusives. *Proc. Geol. Inst. RAS.* 1949. Vol. 103. P. 1–91 (in Russian).

Peshkov A.A., Chernyshov A.I., Bestemyanova K.V. Mineralogical features of ultramafites of the Agardag massif (South-Eastern Tuva). *Geosphere Res.* **2021**. N 1. P. 33–48 (in Russian).

Pfander J.A., Jochum K.P., Kozakov I., Kroner A., Todt W. Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data. *Contrib. Miner. Petrol.* **2002**. Vol. 143. P. 154–174.

Pushkarev E.V., Anikina E.V., Garuti J., Zakkarini F. Chromium-platinum deposits of nizhny-tagal type in the Urals: structural-substantial characteristic and a problem of genesis. *Lithosphere.* **2007**. N 3. P. 28–65 (in Russian).

Stockman H.V., Hlava P.F. Platinum-group minerals in Alpine chromitites from Southwestern Oregon. *Econ. Geol.* **1984**. Vol. 79. P. 491–508.

Talhammer T.V. Association of minerals of platinum group in massive chromite ores of Kempirsai ophiolite complex (Southern Urals) as manifestation of mantle metasomatism. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. N 1. P. 25–36 (in Russian).

Tolstykh N.D. Platinum mineralization of the Konder and Inagli massifs. *Geosphere Res.* **2018**. N 1. P. 17–32 (in Russian).

Tolstykh N., Krivenko A., Sidirov E., Laajoki K., Podlipsky M. Ore mineralogy of PGM placer in Siberia and the Russian Far East. *Ore Geol. Rev.* **2002**. Vol. 20. P. 1–25.

Yurichev A.N., Chernyshov A.I. New Data on platinum group element bearing chromitites from the Kurtushiba Ophiolite, Western Sayan. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 3. P. 38–53 (in Russian, English translation: *Geol. Ore Deposits.* **2020**. Vol. 62. N 8. P. 787–795).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. Platinum-bearing of chromitites in the Kharcheruz ultramafic massif (the Polar Urals): new data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2020**. Vol. 149. N 3. P. 38–53 (in Russian).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Korbovyak E.V. First finds of platinum group minerals in ultramafites of the Kizir-Burluksky massif (Western Sayan). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2021**. Vol. 150. N 4. P. 77–91 (in Russian).

Yurichev A.N., Chernyshov A.I., Kulkov A.S. Ore mineralization of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva). *Bull. Tomsk Polytechnic University.* **2013**. Vol. 323. N 1. P. 130–136 (in Russian).

Yurichev A.N., Rosenbush A.A., Kulkov A.S. Uvarovite from chromitites of the Agardag ultramafic massif (Republic of Tyva): chemistry and genesis. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2018**. Vol. 147. N 1. P. 100–111 (in Russian).

Zhou M.-F., Robinson P., Malpas J., Li Z. Podiform chromites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *J. Petrol.* **1996**. Vol. 37. P. 3–21.