

УДК 549.27(470.5)

**МИНЕРАЛЫ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ
ИЗ РОССЫПИ МУРЗИНСКО-АДУЙСКОГО
ГРАНИТОГНЕЙСОВОГО КОМПЛЕКСА
И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ**

В.В. Мурзин¹, А.Ю. Кисин¹, Д.А. Варламов²

¹ *Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург,
murzin@igg.uran.ru, kissin@igg.uran.ru*

² *Институт экспериментальной минералогии РАН, г. Черноголовка, dima@iem.ac.ru*

**PGM MINERALS FROM PLACER
OF THE MURZINKA-ADUI GRANITE GNEISSIC
COMPLEX AND THEIR POSSIBLE SOURCES**

V.V. Murzin¹, A.Yu. Kissin¹, D.A. Varlamov²

¹ *Institute Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg,
murzin@igg.uran.ru, kissin@igg.uran.ru*

² *Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, dima@iem.ac.ru*

Приводятся результаты исследований минералов платиновой группы (МПП), обнаруженных в ложковых отложениях на Мурзинско-Адуйском гранитогнейсовом блоке (Средний Урал). Из 65 изученных зёрен МПП крупностью 0.1–0.8 мм 42 зерна принадлежит минералам системы Os-Ir-Ru (\pm Pt, Rh), 21 зерно – системе Pt-Fe (\pm Ir, Rh, Pd) и 2 зерна отвечают составу сперрилита PtAs₂. Ассоциация минералов легко- и тугоплавких ЭПГ в изученной россыпи сближает её с нуралинско-верхнейвинским типом платиноидной минерализации и даёт основание предполагать в качестве коренного источника МПП хромититы зон перехода дунит-гарцбургитовых серий офиолитовых пород к полосчатым дунит-клинопироксенитовым. Впервые выделен осмий-рутениевый тренд вариаций состава гексагональных сплавов системы Os-Ir-Ru. Типоморфное значение этого тренда остается пока не выясненным. Обсуждаются возможные источники МПП, среди которых предполагается либо снос с платиноносных массивов ультраосновных пород ближайшего окружения гранитогнейсового блока, либо разрушение местных мелких массивов серпентинитов, известных на участке работ.

Илл. 11. Табл. 7. Библ. 21.

Ключевые слова: Урал, минералы платиновой группы, гранитогнейсы, хромшпинелиды, Мурзинско-Адуйский блок.

The paper presents the results of study of PGM minerals found in a small placer of the Murzinka-Adui granite gneissic block, Central Urals. We studied 65 PGM grains 0.1–0.8 mm in size including 42, 21, and 2 grains of the Os-Ir-Ru (\pm Pt, Rh) and Pt-Fe (\pm Ir, Rh, Pd) system, and sperrylite (PtAs₂), respectively. An assemblage of fusible and refractory PGE minerals in the studied placer is similar to the Nurali-Verkhneyvinsky type of PGE mineralization that may indicate that chromitities from transitional zone between dunite-harzburgite series of ophiolite rocks to the banded dunite-clinopyroxenite ones are the main PGM source. The Os-Ru trend of variation in compositions was distinguished for the first time for the Os-Ir-Ru hexagonal alloys, but the importance of this trend is still unknown. Possible PGM sources including the run-off from the nearest Pt-bearing ultramafic massifs or destruction of small serpentinite bodies known in the studied area are discussed.

Figures 11. Tables 7. References 21.

Key words: Urals, platinum group minerals, granite gneiss, chromite, Murzinka-Adui block.

Введение

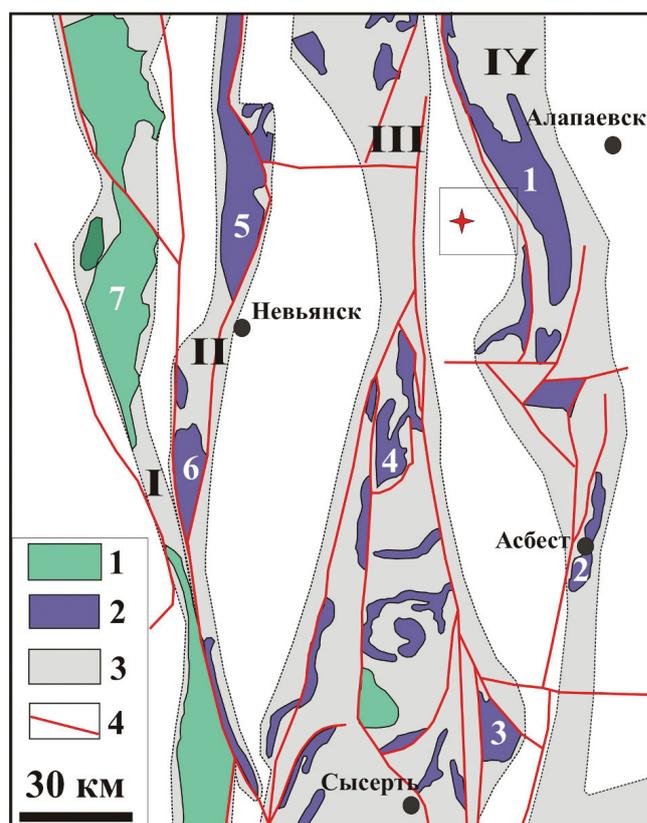
Минералы платиновой группы (МПГ), ассоциирующиеся с хромшпинелидами, достаточно чётко характеризуют проявления мафит-ультрамафитовых пород и связанные с ними россыпи. На Среднем Урале массивы таких пород локализируются в четырех зонах субмеридионального простирания, выделенных на прогнозно-металлогенической карте как рудные платиноносные (рис. 1). Авторами исследованы минералы платиновой группы из рыхлых отложений с участка «Алабашка», расположенного в западной части Мурзинско-Адуйского гранито-гнейсового комплекса, разделяющего Салдинско-Сысертскую (на западе) и Алапаевскую (на востоке) платиноносные зоны.

Участок «Алабашка» расположен в 10 км к ССВ от д. Мурзинка на правом берегу р. Алабашка в пределах широко известного Алабашского поля миароловых пегматитов с бериллом, топазом и другими драгоценными камнями. Участок сложен гнейсами, гнейсо-гранитами, кварц-биотитовыми сланцами, амфиболитами, кварцитами и мраморами. Метаморфическая толща сильно рассланцована, а мраморы кливажированы. Метаморфизм пород достигал условий амфиболитовой, а местами, возможно, и низов гранулитовой фации. Широко распространены дайки гранитоидов и редкометальных пегматитов, интенсивно проявлены последствия диафорических и гидротермальных процессов.

Рис. 1. Схема расположения платиноносных мафит-ультрамафитовых пород Среднего Урала на основе прогнозно-металлогенической карты платиноносных формаций (Золоев и др., 2001).

Условные обозначения: 1 – дунит-клинопироксенит-габбровая ассоциация (ферроклинопироксенит-габбровый и дунит-клинопироксенит-тылаитовый комплексы платиноносного пояса), 2 – дунит-гарцбургитовая офиолитовая ассоциация (дунит-гарцбургитовый и краевой дунит-верлит-клинопироксенитовый комплексы), 3 – платиноносные зоны (I – платиноносного пояса Урала, II – Серовско-Невьянская, III – Салдинско-Сысертская, IV – Алапаевская) и наиболее крупные массивы (1 – Алапеевский, 2 – Баженовский, 3 – Ключевской, 4 – Первомайский, 5 – Верхне-Тагильский, 6 – Верх-Нейвинский, 7 – Нижнее-Тагильский), 4 – тектонические нарушения. Положение геологической карты Алабашского участка отмечено прямоугольной областью. Звёздочкой показано место обнаружения МПГ.

Минералы платиновой группы встречены при производстве поисковых работ на благородный корунд, проведенных ЗАО «Терра-97» в 1997–2000 гг. В пробах из нескольких шурфов, пройденных в Нижнеалабашском логу, кроме золота были обнаружены знаки МПГ, которые иногда даже количественно преобладали над золотом. Шурфы с МПГ расположены очень компактно, на участке 10×15–20 м, за пределами которого находок МПГ не было. Морфология зерен и ассоциация с хромшпинелидами (Кисин, Мурзин, 2014) поставили вопрос о появлении аномалии МПГ среди поля развития гнейсов и гранитоидов. В свете выше отмеченных особенностей возможными коренными источниками данных МПГ могут выступать: а) мелкие тела ультрабазитов, известные на участке (рис. 2); б) Алапаевский ультрабазитовый массив, расположенный в 10–12 км восточнее; в) небольшие тела серпентинитов в 7–8 км к западу, расположенные в зоне тектонической границы гранито-гнейсового блока и являющиеся северным продолжением Первомайского массива. С целью установления вероятных источников МПГ участка «Алабашка» проведено их детальное минералогическое исследование, результаты которого приводятся в данной статье.



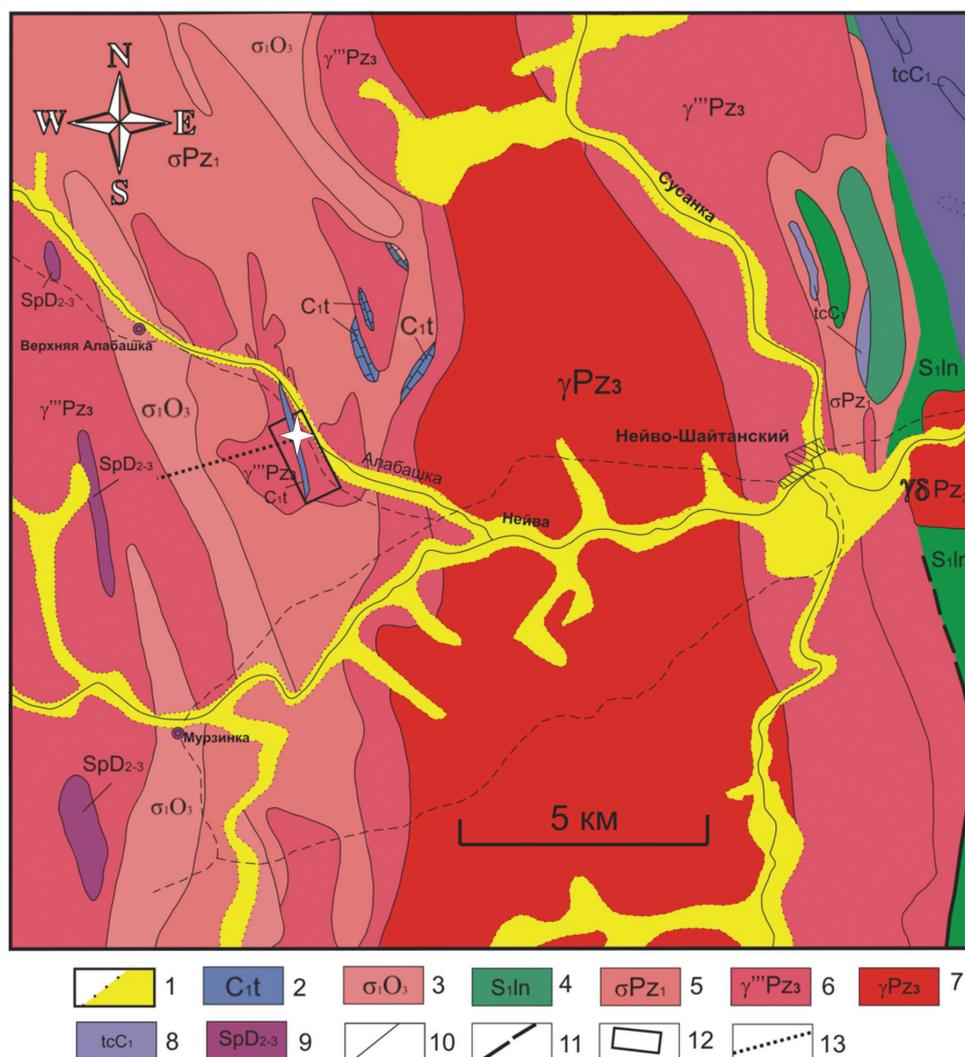


Рис. 2. Схематическая геологическая карта участка «Алабашка» и его окрестностей (по А.В. Коровко, с упрощениями и дополнениями).

Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – мраморы, силикатные мраморы; 3 – гнейсы амфиболовые; 4 – сланцы кремнистые, углисто-кремнистые, кварциты, зелёные сланцы; 5 – гнейсы биотитовые; 6 – гранито-гнейсы; 7 – граниты биотитовые, мусковитовые, двуслюдяные; 8 – талькиты; 9 – серпентиниты; 10 – геологические границы; 11 – крупные тектонические нарушения; 12 – участок поисковых работ на благородный корунд; 13 – Нижнеалабашский лог.

Краткие сведения о геологии россыпи

Поисковый участок площадью 1.0×1.5 км разбурен скважинами шнекового бурения диаметром 150 мм по сети 200×20 м с поинтервальным шлиховым опробованием. Максимальная глубина бурения 25 м. Аллювиальные отложения на исследуемой площади развиты слабо. Как правило, метаморфическая толща здесь перекрыта лишь маломощным (до 3 м, реже более) чехлом загипсованных четвертичных суглинков, в основании которых иногда встречаются песчано-гравийные отложения с редкой мелкой кварцевой галькой. Дешифрирова-

нием космоснимков признаков наличия палеорусел древних рек на участке и прилегающей площади не установлено. Даже низкие и заболоченные участки площади на космоснимках выглядят как изолированные мелкие ванны.

В северной части участок пересекается небольшим субширотным логом, получившим название Нижнеалабашский. В рельефе он отчётливо выражен только в своей нижней части (в интервале 300 м от устья). Выше он в значительной степени подпружен скальными выходами крупнозернистых светлых мраморов, в том числе рубиноносных. Глубина вреза ниже обнажений мраморов дости-

гает 3–4 м, а выше мраморов лог представлен широкой слабо выраженной долиной. Лог фиксирует тектоническую зону, предположительно левого сдвига, судя по несовпадению пород в бортах лога, находкам в логу друз горного хрусталя и жильного кварца с зеркалами скольжения (Кисин, 2005). Ложковые отложения отмечены в логу только ниже выходов мраморов. Мощность их нарастает от нуля на мраморах до 12–15 м в 150 м ниже скальных выходов (устье лога не разбуривалось ввиду сильной заболоченности). Светлые вязкие глины сменяются с глубиной глинисто-песчаными и гравийно-галечными отложениями. Мощность последних достигает 1.8 м. Плотиком служат коры выветривания (вероятно, линейные), прослеженные в логу на глубину до 25 м (глубина поискового бурения). Шурфы, в которых были обнаружены МПГ, расположены в самых верховьях ложковой россыпи и вскрывают разрез аллювиально-делювиальных ложковых отложений и коры выветривания подстилающих пород, представленных кварцбиотитовыми сланцами, амфиболитами, гнейсами, гранитами, пегматитами, биотитовыми слюдитами. Гравийно-галечный материал несортированный, слабо окатанный, представлен преимущественно кварцем и калиевым полевым шпатом. Тяжелая фракция шлихов состоит из магнетита, хромшпинелида, монацита, циркона, ильменита, рутила, колумбита-танталита, сфена, корунда, гранатов уваровит-гроссулярового ряда, амфиболов, диопсида, самородного золота и МПГ.

Методы и результаты исследований

Морфология и химический состав МПГ исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (JEOL-JSM-6390LV, аналитик С.П. Главатских) и электронно-зондового микроанализа (метод волновой дисперсии, Cameca SX100, аналитик Д.А. Замятин). Количественный анализ минералов выполнен при ускоряющем напряжении 15 кВ, силе тока электронного зонда 20 нА, времени накопления импульсов на пике 10 с, на фоне – 5 с, размер электронного зонда на поверхности образца – до 1 мкм, области возбуждения – до 4–6 мкм. Определение содержания основных и примесных элементов выполнено с использованием кристалл-анализаторов ТАР, РЕТ, LIF по следующим аналитическим линиям и стандартным образцам: Ru L_{α} , Rh L_{α} , Pd L_{β} , Os M_{α} , Ir L_{α} , Pt L_{α} , Ni K_{α} (металлы), Te L_{α} (теллурид ртути), Sb L_{α} (антимонид галлия), Fe K_{α} , Cu K_{α} , S K_{α} (халькопирит), As L_{α}

(арсенид индия). Выполнен учет спектральных наложений линий.

Из 65 изученных зерен МПГ, крупность которых варьирует от 0.1 до 0.8 мм, 42 зерна принадлежит минералам системы Os-Ir-Ru (\pm Pt, Rh), 21 зерно – системе Pt-Fe (\pm Ir, Rh, Pd) и 2 зерна отвечают составу сперрилита PtAs₂.

Минералы системы Os-Ir-Ru (Pt, Rh)

В современной номенклатуре МПГ в системе Os-Ir-Ru выделяются четыре минерала – гексагональные самородные осмий, рутений и рутениридосмин, а также кубический иридий (Harris, Cabri, 1991). Трехкомпонентные твердые растворы гексагональных и кубических металлов имеют область несмесимости (рис. 3). В россыпи Нижнеалабашского лога среди минералов системы Os-Ir-Ru в количественном отношении преобладают осмий и рутений, встречены также единичные зерна иридия. Фазы, отвечающие по составу рутениридосмину, не зафиксированы.

Осмий и рутений. Осмий и рутений представлены слабо окатанными в различной степени ограниченными частицами гексагонального облика размером 0.2–0.5 мм (рис. 4). Частицы, как правило, изометричны, реже имеют уплощенную форму. Скульптура их поверхности часто слоистая (особенно характерно для высокорутениевых разновидностей), ямчатая, несущая отпечатки других минералов.

Химический состав осмия и рутения описывается двумя полями (см. рис. 3, А). Первое поле – с содержанием менее 10 ат.% Ru формируют так называемый иридиевый тренд, второе поле с содержаниями более 20 ат.% Ru плавно переходит из поля осмия в поле рутения, образуя осмий-рутениевый тренд. Химический состав типовых зерен осмия, рутения и иридия приведен в табл. 1. В пределах отдельных зерен вариации содержаний основных компонентов, как правило, не превышают 1 мас.%. Примеси благородных металлов (Cu, Ni, Fe), а также Pd содержатся на уровне сотых-первых десятых долей процента. Содержания S, As, Sb, Te – ниже 0.1 мас.%, т.е. в пределах погрешности микроанализа. Более значимыми примесями в осмии и рутении являются Pt, Rh и Fe, составляющие, однако, в сумме не более 5 ат.%.

Минеральные включения в осмии осмий-рутениевого тренда (Os, Ru, Ir) представлены кристаллами лаурита, а в осмии иридиевого тренда (Os, Ir) – железистой платиной, состав которой по соотно-

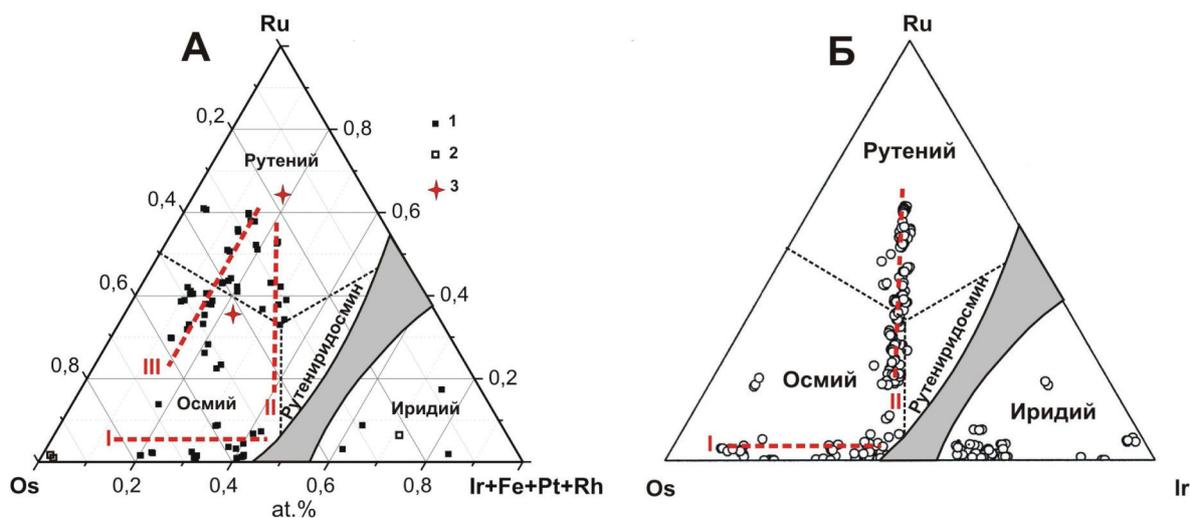


Рис. 3. Номенклатура и состав минералов системы осмий-иридий-рутений (Harris, Cabri, 1991) Алабашской россыпи (А) и россыпей Верх-Нейвинского массива (Б). Минералы представлены самостоятельными частицами (1) или находятся в виде включений в железистой платине (2). Звездочкой (3) показаны анализы осмия и рутения из хромитов Ключевского массива (Zaccarini et al., 2008). Серое поле – область несмесимости твердых растворов. Тренды вариаций составов: I – иридиевый, II – рутениевый, III – осмий-рутениевый.

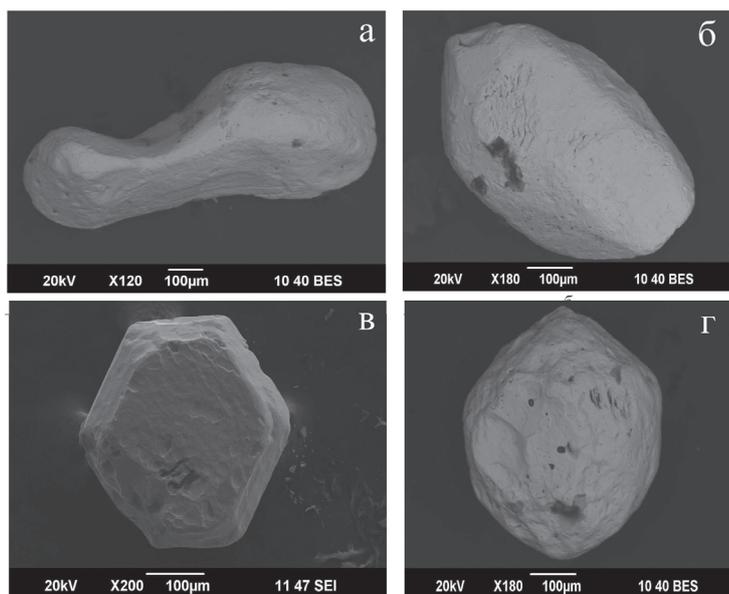


Рис. 4. Морфология зерен рутения (а) и осмия (б-г).

шению Pt:Fe=3:1 близок к изоферроплатине (табл. 2). Кристаллические включения лаурита имеют размеры 5–20 мкм, а единственное зафиксированное таблитчатое включение железистой платины – на порядок более крупное (рис. 5, а–б). Минеральные включения в рутении представлены округлыми частицами железо-платиновой фазы размером до 10 мкм, состав которой по соотношению благородных и неблагородных металлов отвечает формуле $(\text{Fe,Cu,Ni})(\text{Pt,Rh,Ir})_2$ (табл. 2, ан. 34-3 и 34-4).

Иридий. Частицы иридия размером до 0.5–0.7 мм имеют среднюю степень окатанности и пред-

ставлены, как правило, кристаллами со слабо или сильно кавернозной поверхностью (рис. 6, а–б). На поверхности одного из зёрен иридия отражается его фазовая неоднородность (рис. 6, в). Эта неоднородность вызвана, по-видимому, распадом поликомпонентного твёрдого раствора (Ir, Os, Ru, Rh, Pt, Fe), в результате которого образована решетчатая структура агрегата новообразованных фаз (рис. 6, г). Матричная фаза этого агрегата, имеющая существенно иридиевый состав ($\text{Ir} \pm \text{Os, Ru, Rh, Pt}$), пронизана ориентированными в трех направлениях пластинками существенно осмиевого состава ($\text{Os} \pm \text{Ir, Ru}$) (табл. 3). На границах осмиевой пластинчатой фазы и особенно в местах сочленения пластинок разной ориентировки обособилась фаза, отвечающая по составу иридий-, родийсодержащей изоферроплатине $(\text{Pt,Ir,Rh})_3\text{Fe}$.

Среди минералов системы Os-Ir-Ru иридий характеризуется наибольшим суммарным содержанием Fe+Rh+Pt (см. табл. 1). При низких содержаниях Cu, Ni и Pd, не превышающих 0.1–0.2 мас. %

Таблица 1

Химический состав типовых зерен минералов системы Os-Ir-Ru россыпи Алабашского лога, мас. %

№ зерна	Fe	Ru	Rh	Ir	Pt	Ni	Os	Cu	Pd	Total	Минерал
9	0.39	10.54	8.44	67.21	1.67	0.0	9.21	0.0	0.0	97.46	Ir,Ru,Rh,Os
10	0.26	1.64	0.67	56.94	3.11	0.11	35.87	0.0	0.10	98.7	Ir,Os
11	0.91	5.06	3.08	52.59	6.99	0.12	31.08	0.0	0.09	99.92	Ir,Os,Ru,Pt,Rh
16	0.18	0.64	0.04	41.97	0.0	0.0	58.84	0.02	0.15	101.8	Os,Ir
29	0.01	17.31	0.39	23.48	0.0	0.0	58.41	0.0	0.13	99.73	Os,Ru,Ir
36	0.11	0.56	0.14	29.55	1.68	0.01	67.21	0.01	0.06	99.33	Os,Ir
38	0.09	27.33	0.75	12.05	0.0	0.01	60.08	0.0	0.06	100.4	Os,Ru,Ir
30	0.02	45.20	0.0	5.41	0.67	0.03	49.08	0.0	0.11	100.5	Ru,Os,Ir
32	0.03	26.68	0.36	19.07	5.76	0.0	47.13	0.0	0.02	99.05	Ru,Os,Ir,Pt
34	0.57	22.16	0.9	36.3	1.42	0.07	38.97	0.0	0.0	100.4	Ru,Os,Ir
48	0.12	42.04	0.14	20.52	0.57	0.04	36.08	0.0	0.07	99.58	Ru,Os,Ir

Таблица 2

Химический состав включений в осмии и рутении и продуктов распада иридиевого твердого раствора, мас. %

№ анализа	Минерал	Fe	Ru	Rh	Ir	Pt	Ni	Os	Cu	Pd	S	Total	Включения
29-3	Os,Ru,Ir	0.0	58.55	0.23	1.06	0.0	0.0	2.1	0.0	0.05	38.51	100.50	Лаурит, RuS ₂
62-2	То же	-	60.85	-	0.58	-	-	1.26	-	-	37.32	100	То же
62-3	-»-	-	56.11	-	3.15	-	-	5.25	-	-	35.49	100	-»-
37-3	Os,Ir	9.11	0.0	0.38	2.14	85.44	0.12	0.2	0.74	0.0	0.0	98.13	(Pt, Ir) ₃ (Fe,Cu)
34-3	Ru,Os,Ir	10.63	0.17	2.42	3.21	79.58	1.9	0.18	1.4	0.18	0.0	99.67	(Pt,Rh,Ir) ₂ (Fe,Cu,Ni)
34-4	То же	10.04	0.1	1.97	3.18	81.24	1.02	0.24	1.51	0.06	0.0	99.36	То же
11-2	Ir,Os,Ru, Rh,Pt,Fe	0.48	7.11	1.16	38.27	0.57	0.05	51.54	0	0.01	0.0	99.19	Os,Ir,Ru
11-4	То же	9.15	0.02	2.08	6.06	78.04	0.41	0.41	0.64	0.31	0.0	97.12	(Pt,Ir,Rh) ₃ Fe

Примечание. Состав фаз в зерне 62 определен на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6390LV, оснащенном энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Сумма компонентов при измерениях приведена к 100 %. Содержания Sb, As и Te ниже чувствительности микроанализа. Прочерк – в энергодисперсионном спектре линии элемента не зафиксированы, элемент не определялся. Фазы 11-2 и 11-4 – продукты распада твердого раствора (Ir,Os,Ru,Rh,Pt,Fe).

и присущих всем минералам системы Os-Ir-Ru, в иридии, тем не менее, обнаруживаются многочисленные включения минералов этих элементов (рис. 5, в-г). Среди этих включений, имеющих округлые или угловатые формы и размеры до 10–

15 мкм, выявлены фазы, принадлежащие палладиистой изоферроплатине, сульфидам меди и палладия, а также теллуридам, сульфотеллуридам и арсенотеллуридам палладия (табл. 4).

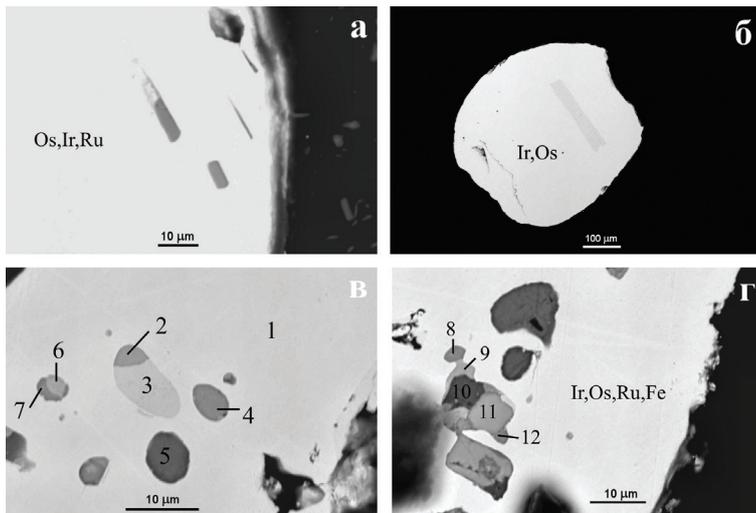


Рис 5. Минеральные включения в осмии, рутении и иридии: а – кристаллы лаурита RuS_2 в краевой части зерна осмия (Os,Ir,Ru); б – пластинчатое включение железистой платины $(Pt, Ir)_3(Fe, Cu)$ в осмии (Os, Ir); в, г – включения в зерне иридия (химический состав включений приведен в табл. 2): 1 – матричная фаза (Ir, Os, Ru, Fe) , 2 – $Pd_3(As, Te)$, 3 – $(Pt, Pd)_3Fe$, 4 – $(Cu, Ni)Pd_4S_2$, 5 – $(Cu, Fe)_3S_2$, 6 – кейтконит Pd_3Te , 7 – $(Pd, Cu)_3(Te, S)$ или торнроусит $Pd_{11}CuTe_2S_2$, 8 – $(Cu, Ni)Pd_4S_2$, 9 – $Pd_3(Te, As)$, 10 – $(Cu, Fe)_2S$, 11 – купроиридсит $Cu(Ir, Rh)_2S_4$, 12 – $(Cu, Ni)Pd_4S_2$. Химический состав включений приведен в табл. 4.

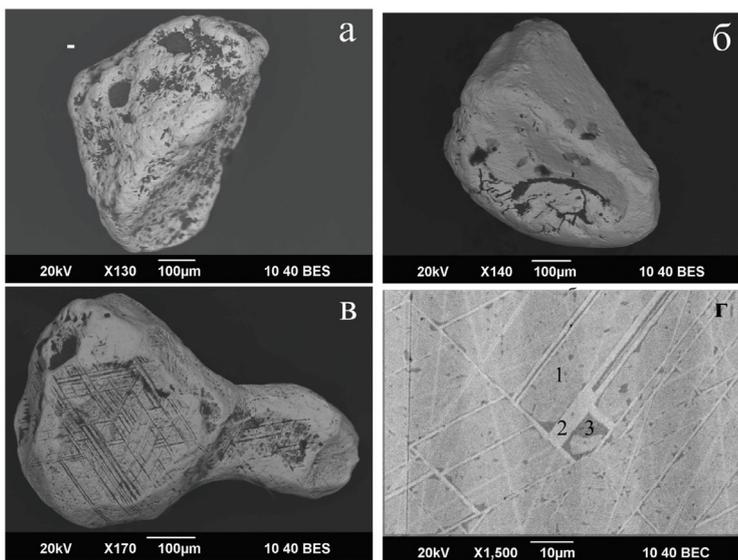


Рис. 6. Морфология зерен иридия (а–в) и внутреннее строение зерна иридия (г) из россыпи Алабашского лога. Химический состав фаз в иридии приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав продуктов распада иридиевого (Pt-Os-Ir) твердого раствора, мас. %

№ точки	Fe	Ru	Rh	Ir	Pt	Ni	Os	Cu	Pd	Total	Минерал
1	0.91	5.06	3.08	52.6	6.99	0.12	31.1	0	0.09	99.95	Ir, Os, Ru, Rh
2	0.48	7.11	1.16	38.3	0.57	0.05	51.5	0	0.01	99.18	Os, Ir, Ru
3	9.15	0.02	2.08	6.06	78.04	0.41	0.41	0.64	0.31	97.12	$(Pt, Ir, Rh)_3Fe$.

Примечание. Номера точек в таблице соответствуют их положению на рис. 6, г.

Таблица 4

Химический состав минеральных включений в зерне иридия, мас.%

№ зерна	Pd	Pt	Rh	Os	Ir	Ru	Fe	Ni	Cu	As	Te	S	Включения
1	-	-	-	10.03	87.33	1.78	0.86	-	-	-	-	-	Ir,Os,Ru,Fe
2	75.12	-	-	-	-	-	-	-	-	8.05	16.83	-	Pd ₃ (As,Te)
3	11.67	78.21	-	-	-	-	10.12	-	-	-	-	-	(Pt,Pd) ₃ Fe
4	76.73	-	-	-	-	-	-	0.94	10.54	-	-	11.79	(Cu,Ni)Pd ₄ S ₂
5	-	-	-	-	-	-	6.65	-	67.26	-	-	26.09	(Cu,Fe) ₃ S ₂
6	73.15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26.85	-	Pd ₃ Te
7	74.74	-	-	-	-	-	-	-	3.96	-	17.36	3.94	(Pd,Cu) ₃ (Te,S)
8	77.76	-	-	-	-	-	-	2.98	8.17	-	-	11.10	(Cu,Ni)Pd ₄ S ₂
9	72.16	-	-	-	-	-	-	-	-	1.81	26.03	-	Pd ₃ (Te,As)
10	-	-	-	-	-	-	5.91	-	73.55	-	-	20.55	(Cu,Fe) ₂ S
11	-	-	6.38	-	56.62	-	-	-	11.26	-	-	25.74	Cu(Ir,Rh) ₂ S ₄
12	76.30	-	-	-	-	-	-	1.18	10.77	-	1.30	10.44	(Cu,Ni)Pd ₄ S ₂

Примечание. Состав фаз определен на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6390LV, оснащенный энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments. Сумма компонентов при измерениях приведена к 100%. Прочерк – в энергодисперсионном спектре линии элемента не зафиксированы, элемент не определялся. Номера включений в таблице и на рис. 5, в и 5, г совпадают.

Минералы платины

Среди МПГ в россыпи Алабашского лога нами обнаружены два Pt-доминирующих минерала – преобладающая в количественном отношении железистая платина и редкие зерна сперрилита PtAs₂. Зерна железистой платины имеют среднюю степень окатанности, уплощенную или комковидную форму и размеры 0.1–0.8 мм (рис. 7, а–в). На их поверхности фиксируются слаборельефные округлые отпечатки зёрен минералов коренной породы или более рельефные ориентированные в нескольких направлениях борозды, обусловленные наличием в платине пластинок осмия. На одном из окатанных зёрен железистой платины присутствует очень тонкая пленка высокопробного самородного золота (в спектре зафиксированы только матричные элементы – Pt, Fe и Au).

Химические составы изученных нами 20 зёрен платины (табл. 5) довольно выдержаны по содержаниям основных компонентов и отвечают в современной номенклатуре железистой платине, т.е. кубическим твёрдым растворам платины и железа. Содержание железа в железо-платиновом твёрдом растворе увеличивается от 6.0 до 9.9 мас.% (17–27 ат.% Fe), достигая состава изоферроплатины

Pt₃Fe. В заметных количествах присутствуют примесные компоненты (мас.%): Cu до 1.8, Ir до 3.8, Rh до 2.5, Os и Pd до 1.5.

Включения в железистой платине разнообразны – хромшпинелид, самородные осмий и иридий, сульфиды меди, железа, родия, платины, палладия, рутения, а также арсенид родия и платины (рис. 8, табл. 6).

Кристаллические включения хромшпинелида размером до 15–20 мкм обнаружены в зерне наименее железистой платины (рис. 9). Химический состав двух изученных включений отвечает высокохромистой разновидности хромшпинелида (в мас.%): Cr₂O₃ 55.1–55.3; FeO 21.4–21.9; Al₂O₃ 7.5–7.8; MgO 9.17–9.57; TiO₂ 0.24–0.26; MnO 0.05–0.06.

Включения самородных осмия и иридия в железистой платине имеют, как правило, овальную форму или пластинчатую и размеры не более 50 мкм (рис. 8, а). Изученное включение иридия богато примесями Os, Pt, Ru и, в целом, состав его сходен с составом иридия, слагающего самостоятельные частицы. Осмий из включений в железистой платине по отношению к его составу в самостоятельных частицах беден примесями (97–98 мас.% Os). На диаграмме Os-Ir-Ru точки осмия из включений

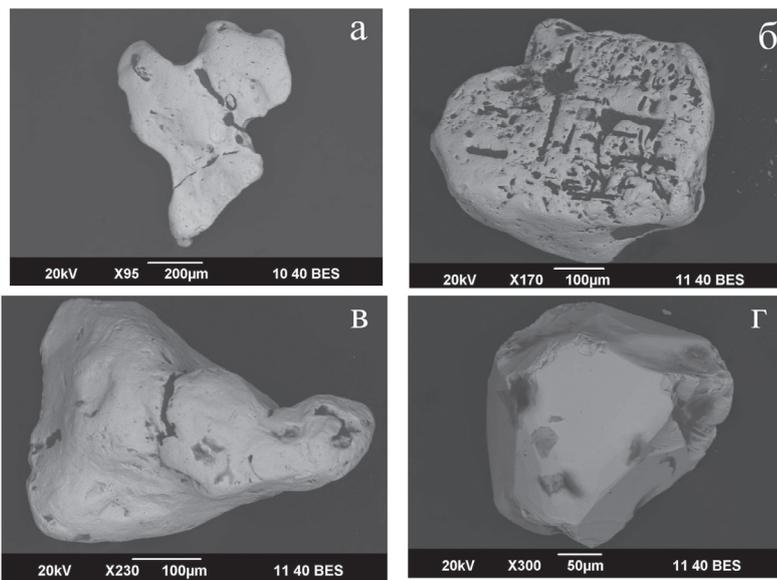


Рис. 7. Форма зёрен и плоских сечений железистой платины (а–в) и сперрилита (г).

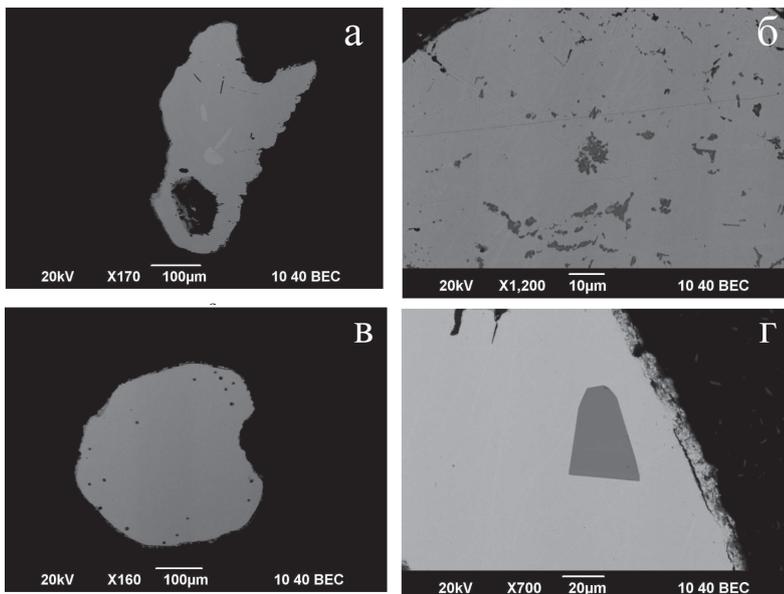


Рис. 8. Минеральные включения в зёрнах железистой платины Алабашского лога: а – пластинчатые включения осмия в зерне 3, б – многочисленные угловатые включения родарсенида в зерне 2, в – округлые включения тиошпинели купрородсит-маланитовой серии в краевых частях зерна 4, г – кристалл лаурита в зерне 64. Номера зерен на фото соответствуют номерам в табл. 6.

в платине располагаются в отдельном поле, не совпадающем с полями осмия иридиевого и осмий-рутениевого трендов (см. рис. 3).

Многочисленные угловатые включения арсенида родия размером, как правило, менее 5 мкм образуют густую вкрапленность в отдельных частицах железистой платины (см. рис. 8, б). Химический состав этой фазы лучше всего отвечает родарсениду $(\text{Rh}, \text{Pd})_2\text{As}$.

Включения сульфидов в железистой платине представлены мелкими (10 мкм и менее) округлыми кристаллами тиошпинели купрородсит-маланитовой серии $(\text{CuRh}_2\text{S}_4\text{--CuPt}_2\text{S}_4)$, локализованными в краевых частях зёрен платины (см. рис. 8, в). Помимо меди тиошпинель содержит также значительное количество железа (табл. 6, ан. 4–2), что сближает ее с феррородситом $(\text{Fe}, \text{Cu})(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$.

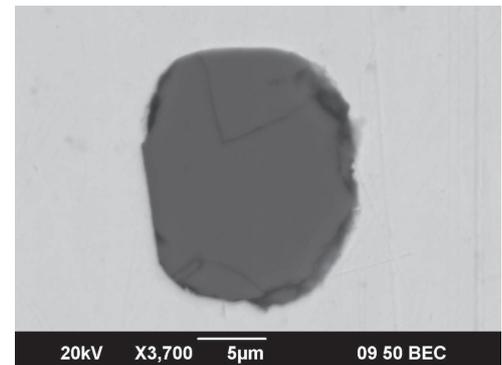


Рис. 9. Включение хромшпинелида в зерне железистой платины.

Таблица 5

Химический состав зерен железистой платины, мас.%

№ зерна	Fe	Ru	Rh	Ir	Pt	Ni	Os	Cu	Pd	Сумма	Fe+Cu+Ni, at.%
1	8.59	0.07	1.41	3.84	83.58	0.0	0.27	0.52	0.17	98.45	25.91
2	6.7	0.0	0.45	0.64	88.74	0.15	0.53	1.84	0.0	99.05	24.57
3	7.53	0.0	1.17	0.0	87.89	0.11	0.45	0.48	1.45	99.08	23.33
4	9.05	0.0	0.92	1.34	85.61	0.16	0.24	0.70	0.95	98.97	27.52
5	6.96	0.35	2.0	0.08	87.18	0.0	0.68	0.94	0.78	98.97	22.59
6	8.2	0.27	0.41	3.25	84.43	0.07	1.50	1.20	0.0	99.33	26.28
7	6.81	0.21	1.76	0.22	87.56	0.03	0.91	0.97	0.39	98.86	22.46
8	6.19	0.22	1.93	0.02	89.25	0.15	1.11	0.28	0.28	99.43	19.54
12	8.71	0.04	0.57	0.21	87.95	0.01	0.50	0.65	0.31	98.95	26.49
22	5.73	0.28	1.78	0.0	88.68	0.17	1.43	0.40	0.66	99.13	18.66
40	6.09	0.29	2.29	0.29	87.96	0.0	1.23	0.30	0.37	98.82	18.97
41	6.0	0.18	1.88	0.75	86.96	0.19	0.75	0.41	1.22	98.34	19.49
42	8.1	0.03	1.50	2.75	84.99	0.10	0.23	0.87	0.72	99.29	25.39
47	5.76	0.20	2.05	1.32	88.37	0.09	0.63	0.40	0.51	99.33	18.58
50	8.17	0.06	2.28	0.0	86.23	0.11	0.39	1.35	0.73	99.32	26.48
54	9.89	0.14	1.40	2.59	83.23	0.09	0.22	0.55	0.27	98.38	29.06
56	6.0	0.08	2.31	0.12	88.89	0.06	1.14	0.46	0.63	99.69	19.20
58	6.97	0.12	2.04	0.0	87.44	0.11	0.60	0.63	0.38	98.29	22.42
63	6.25	0.27	2.47	1.26	88.07	0.04	0.50	0.48	0.81	100.15	19.65
64	8.48	0.04	0.84	0.74	87.81	0.03	0.27	0.85	0.34	99.40	26.27

Таблица 6

Химический состав включений в зернах платины, мас.%

№ анализа	Ru	Os	Ir	Rh	Pt	Pd	Fe	Cu	Ni	As	S	Сумма	Состав	Минерал
1-3	3.10	29.13	52.74	2.21	12.28	0.00	0.52	0.00	0.04	0.00	0.00	100.02	Ir,Os,Pt, Ru,Rh	иридий
3-2	0.20	98.20	0.19	0.84	0.55	0.00	0.02	0.07	0.07	0.03	0.00	100.17	Os	осмий
3-3	0.23	97.15	1.83	0.48	0.23	0.06	0.00	0.02	0.09	0.00	0.01	100.10	Os	осмий
2-2	0.13	0.21	1.87	49.87	18.11	0.39	1.71	0.09	0.01	26.10	0.00	98.49	(Rh,Pt,Ir, Fe) ₂ As	родарсенид ?
4-2	0.17	0.00	2.55	30.86	17.15	0.45	6.37	12.11	1.47	0.00	30.26	101.39	(Cu,Fe,Ni) (Rh,Pt) ₂ S ₄	купорродсит-маланит
4-3	0.00	0.09	0.48	2.29	27.33	20.48	13.32	16.76	0.57	0.01	17.50	98.83	(Cu,Fe) ₃ (Pt,Pd,Rh) ₂ S ₃	не-названный
64-2	47.65	11.56	2.70	1.16	0.51	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	36.01	99.65	(Ru,Os)S ₂	лаурит

Состав одного из включений в этом же зерне платины не идентифицирован и отвечает идеализированной формуле $(\text{Cu,Fe})_3(\text{Pt,Pd,Rh})_2\text{S}_3$ (ан. 4–3 в табл. 6). В краевой части другого зерна платины обнаружено кристаллическое включение лаурита $(\text{Ru,Os})\text{S}_2$ (см. рис. 8, г). В составе этого включения содержится больше эрликманитовой компоненты (11.6 мас.% Os), нежели в лаурите из включений в осмии (1.3–5.3 мас.% Os).

Сперрилит представлен слабо окатанными изометричными кристаллами размером 0.1–0.3 мм (см. рис. 8). Кристаллы его местами сколоты с отчетливым раковистым изломом. Химический состав сперрилита (табл. 7) практически идеально отвечает его теоретическому составу. Примесные компоненты в значимых количествах не зафиксированы.

Обсуждение результатов

Наиболее крупные массивы Салдинско-Сысертской зоны (с юга на север) – Ключевской, Пышминский, Первомайский, а в Алапаевской зоне – Баженовский, Режевской, Останинский и Алапаевский, сложены породами дунит-гарцбургитового и дунит-верлит-клинопироксенитового комплексов. Повышенная платиноносность в коренных породах, выявленная в Алапаевском, Первомайском и Ключевском массивах (Garuti et al., 1999; Золоев и др., 2001; Пушкарев и др., 2006; Волченко и др., 2008), связывается с хромовыми рудами различных частей мафит-ультрамафитового разреза этих массивов. Минералы платиновой группы описаны лишь в густовкрапленных и массивных хромититах Ключевского массива, в которых они образуют включения в хромшпинелиде размером 40 мкм и менее (Garuti et al., 1999; Пушкарев, 2006; Zaccarini et al., 2008). МПГ принадлежат Os-Ir-Ru ассоциации и представлены преимущественно лауритом, самородными осмием и рутением, а также редкими сульфидами, арсенидами и сульфоарсенидами (эрликманит, купроиридсит, рутенарсенит, ирарсит и др.). Данный набор МПГ характерен для офиолитовых высокохромистых хромититов и может быть отнесен к кемпирсайскому рутений-иридий-осмиевому типу, специализированному на тугоплавкие ЭПГ (Волченко и др., 2008).

Значительно большим распространением к востоку от Мурзинско-Адуйского блока пользуются комплексные золото-платиновые россыпи, которые известны с начала прошлого века (Высоцкий, 1923). Эти россыпи распространены в водотоках,

Таблица 7

Химический состав кристаллов сперрилита, мас.%

№ зерна	25	26	27
Pt	54.30	54.60	55.30
Rh	0.24	0.21	0.16
Pd	0.0	0.04	0.0
Ir	0.0	0.0	0.0
Os	0.15	0.22	0.14
Ru	0.0	0.04	0.0
Fe	0.0	0.04	0.04
Cu	0.02	0.0	0.0
Ni	0.04	0.04	0.06
S	0.01	0.0	0.0
As	44.09	43.95	44.17
Сумма	98.85	99.14	99.87

дренирующих преимущественно Алапаевскую зону платиноносных пород (рр. Нейва, Реж, Рефт, Пышма). Сведения о МПГ в этих россыпях в литературе отсутствуют.

В проведенном нами ранее исследовании хромшпинелида из отложений Алабашского лога (Кисин, Мурзин, 2014) установлено, что значительная часть его зёрен принадлежит метаморфической разновидности, содержащей повышенное количество цинка (рис. 10). По соотношению Fe/Fe+Mg и Cr/Cr+Al лишь небольшая часть зёрен аналогична акцессорной хромшпинели Алапаевского массива или хромититов Ключевского массива, локализуемого в южной части Салдинско-Сысертской платиноносной зоны. В то же время, существенная часть зёрен хромшпинелида Нижнеалабашского лога имеет высокохромистый состав, аналогичный рудным хромшпинелидам латераль-секреционного, ортомагматического и особенно метасоматического генетических типов Кемпирсайского рудного поля на Южном Урале (рис. 10, поля VIII–X). В поле рудной хромшпинели метасоматического генетического типа располагаются и имеющиеся в нашем распоряжении два анализа включений хромшпинелида из железистой платины Нижнеалабашского лога.

Приведенные нами данные показывают, что помимо преобладающих МПГ Os-Ir-Ru ассоциации, в отложениях Нижнеалабашского лога существенна роль минералов Pt-Rh-Pd ассоциации, представленных, прежде всего железистой платиной. В зёр-

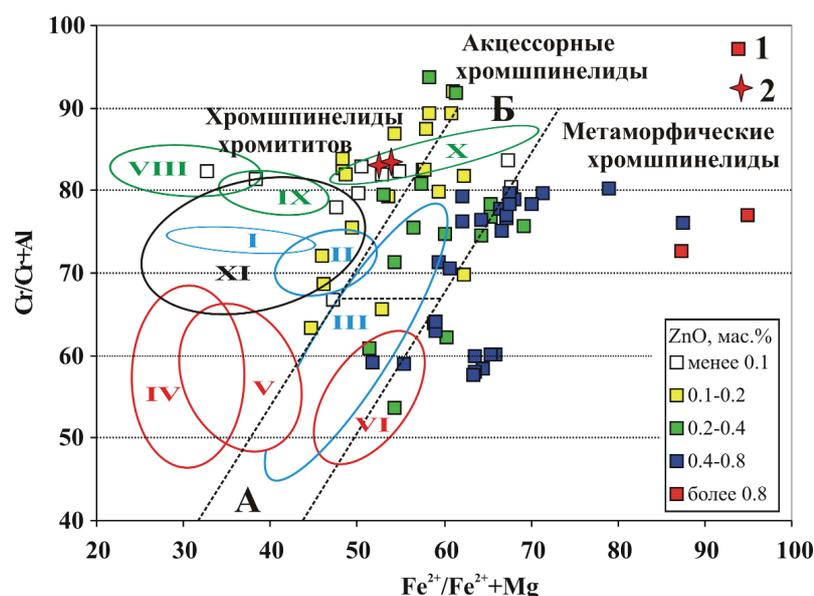


Рис. 10. Состав хромшпинелида с различным содержанием ZnO из отложений Алабашского лога (1) и из включений в железистой платине (2) на диаграмме «железистость $Fe^{2+}/Fe^{2+}+Mg$ » – «хромистость $Cr/(Cr+Al)$ ».

На диаграмму нанесены поля: акцессорного хромшпинелида из гарцбургитов (А) и дунитов (Б) из офиолитовых гипербазитов Урала (Чашухин и др., 2004); рудных и акцессорных хромшпинелей западного (I–III) и восточного (IV–VI) блоков Алапаевского массива (Чашухин, Вотяков, 2012); рудных хромшпинелей латераль-секреционного (IX), ортомагматического (VIII) и метасоматического (X) генетических типов Кемпирсайского рудного поля (Чашухин и др., 2007); хромититов Ключевского массива, в которых заключены МПГ Os-Ir-Ru ассоциации (Zaccarini et al., 2008) (XI). Поля А, Б, II, III и VI – состав акцессорного хромшпинелида; поля I, IV, V, VIII, IX–XI – состав рудного хромшпинелида.

нах МПГ Os-Ir-Ru ассоциации присутствуют включения платины и, наоборот, в МПГ Pt-Rh-Pd ассоциации обнаружены самородные и сульфидные фазы осмия, иридия и рутения. Для самородных МПГ Os-Ir-Ru ассоциации характерны также повышенные содержания примесей платины, достигающие 5.8 мас.% (см. табл. 1). Совмещение минералов Os-Ir-Ru и Pt-Rh-Pd ассоциаций свойственны минерализации нуралинско-верхнейвинского типа (платино-иридиево-рутениево-осмиевого), характеризующего хромититы зон перехода дунит-гарцбургитовых серий пород к краевым полосчатым дунит-клинопироксенитовым (Волченко и др., 2008). На Среднем Урале такие хромититы присущи офиолитовым массивам Серовско-Невьянской зоны (Верх-Нейвинский, Восточно-Тагильский), расположенным в наиболее западной полосе офиолитовых массивов (см. рис. 1).

МПГ нуралинско-верхнейвинского типа минерализации наиболее полно изучены в Верх-Нейвинском массиве на Среднем Урале (Мурзин и др., 1999; Мурзин, Сустанов, 2000; Баданина и др., 2013; Варламов, Мурзин, 2014). Сравнительный анализ минералогии платиноидов в россыпях Верх-Нейвинского массива и Алабашского лога

показывает, что, несмотря на сходство в совмещенности в этих россыпях минералов Os-Ir-Ru и Pt-Rh-Pd ассоциаций, имеются и существенные различия, проявленные в количестве парагенезисов, наборе и составе МПГ Os-Ir-Ru и Pt-Rh-Pd ассоциаций.

В россыпях Верх-Нейвинского массива нами выделены последовательно образующиеся парагенезисы МПГ Os-Ir-Ru и Pt-Rh-Pd ассоциаций – первичный, вторичный коррозионный и вторичный наложенный. Первичные парагенезисы представлены самородными и сульфидными минералами систем Os-Ir-Ru и Pt-Fe. Комплекс вторичных минералов МПГ сформирован при коррозии зерен первичных парагенезисов и обрастании их вновь образованными фазами и хорошо сохранился в россыпях на поверхностях зёрен первичных минералов МПГ. Он представлен достаточно мощными (до 300 мк) каймами, иногда замещающими нацело первичные зерна (рис. 11). Каймы имеют, как правило, хорошо выраженную зональность: сульфоарсениды и арсениды Ir, Os, Ru в смеси с осмием → смесь сульфоарсенидов и сульфидов → сульфиды, сульфоантимониды и новообразованные интерметаллиды ($OsIr_2$) или чистые Os и Ru → зональные идиоморфные лаурит-эрликманиты. В россыпи

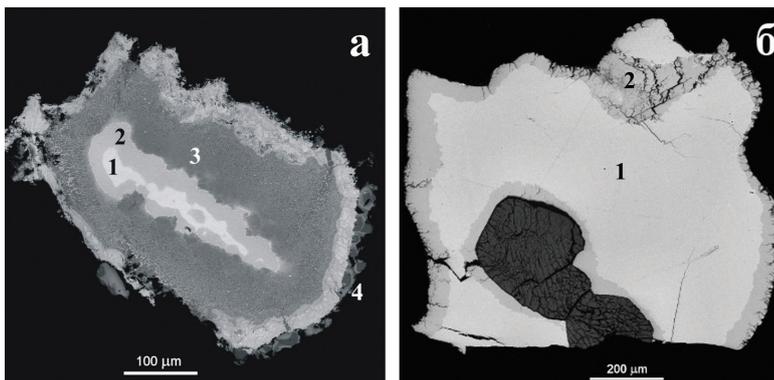


Рис. 11. Вторичные коррозионный и наложенный парагенезисы МПГ россыпей Верх-Нейвинского массива. а – коррозионное замещение самородного осмия (1) пористыми агрегатами фаз Os+(Ir,As) (2), (Ir,Pt,Rh)AsS (3) и обрастание их кристаллами МПГ наложенного парагенезиса сульфидов МПГ (4); б – развитие коррозионной каймы туламинита (2) по зерну тетраферроплатины (1).

Алабашского лога признаки многогенеративности МПГ, коррозии и обрастания одних МПГ другими отсутствуют.

Сравнительным анализом МПГ россыпей Алабашского лога и Верх-Нейвинского массива выявлены также существенные различия в химическом составе гексагональных минералов системы Os-Ir-Ru. Если в Верх-Нейвинском массиве вариации состава гексагональных осмия и рутения описываются иридиевым и рутениевым трендами, то в россыпи Алабашского лога иридиевый тренд сочетается с ранее не выделявшимся в литературе осмий-рутениевым трендом (см. рис. 3). Как известно, рутениевый тренд характерен для дунит-гарцбургитовых серий офиолитовых пород и связанных с ними россыпей, а иридиевый – для концентрически-зональных дунит-клинопироксенитовых массивов (Bird, Bassett, 1980; Cabri et al., 1996; Баданина и др., 2013; Толстых, 2006; Малич и др., 2013 и др.).

Нам представляется, что присутствие иридиевого и рутениевого трендов МПГ системы Os-Ir-Ru в россыпях Верх-Нейвинского массива соответствует строению этого массива. Он сложен породами дунит-гарцбургитового комплекса с хромититами, несущими МПГ рутениевого тренда, и породами краевого полосчатого дунит-клинопироксенитового комплекса, хромититы которого характеризуются фазами иридиевого тренда и присутствием минералов Pt, Rh, Pd.

Другим отличием МПГ рассматриваемых россыпей является широкий набор минералов собственно платины в Верх-Нейвинском массиве, где помимо сперрилита и кубических железо-платиновых сплавов, описанных выше в россыпи Нижнеалабашского лога, распространены и тетрагональные (тетраферроплатина, туламинит, ферроникельплатина).

Вторичные парагенезисы МПГ связываются в литературе с постмагматическими метаморфиче-

скими и метасоматическими преобразованиями первичных МПГ. Типоморфными МПГ вторичных парагенезисов являются сульфиды, арсениды, стибниды и теллуриды ЭПГ, часто в соединениях с неблагородными металлами (медью, никелем, железом), что особенно ярко проявлено в россыпях Верх-Нейвинского массива, породы которого практически нацело превращены в антигоритовые серпентиниты. Развитие вторичных МПГ постмагматической стадии зафиксировано и в хромититах Ключевского массива (Garuti et al., 1999; Zaccarini et al., 2008). Не исключено, что к МПГ постмагматического происхождения в Нижнеалабашской россыпи относится арсенид платины (сперрилит), а также иридий и железистая платина, в которых обнаружены вросстки сульфидов, арсенидов, теллуридов, в состав которых входят иридий, палладий, родий, медь, никель. В поле рудной хромшпинели метасоматического генетического типа располагаются и имеющиеся в нашем распоряжении два анализа включений хромшпинелида из железистой платины Нижнеалабашского лога (см. рис. 10).

Коснемся вопроса о местоположении коренных источников МПГ в Нижнеалабашском логу. Краевые полосчатые серии пород, для хромититов которых характерно сочетание МПГ Os-Ir-Ru и Pt-Rh-Pd ассоциаций, известны в массивах как Салдинско-Сысертской (Первомайский и Ключевской массивы), так и Алапаевской платиноносных зон. В Первомайском массиве хромититы в дунит-клинопироксенитовом комплексе развиты в восточной части Центрального рудного поля, а в Ключевском – в Южном рудном поле (Чашухин и др., 2005). В Алапаевском массиве дунит-верлит-клинопироксенитовый комплекс закартирован в его северном окончании (Золоев и др., 2001). В тоже время, в МЗ-КЗ на восточном склоне Урале устойчиво преобладает снос с запада на восток. Поэтому снос из-

ученных нами МПГ наиболее вероятен с запада. Но на смежной с запада с Мурзинско-Адуйским блоком Салдинско-Сысертской металлогенической зоне в рассматриваемом широтном интервале россыпей МПГ не известно. На космоснимках не фиксируются также признаки палеорусел. Нахождение МПГ на участке очень компактное, только в головке ложковой россыпи, совместно с золотом. Большинство проб содержат только золото, в некоторых пробах золото преобладает над МПГ, а в некоторых – МПГ преобладает над золотом. Такой факт необъясним дальним переносом и сортировкой этих металлов водным потоком. Вместе с МПГ в Нижнеалабашском логу отмечается повышенное содержание хромшпинелида, лишь небольшая часть зёрен которого аналогична аксессуарной хромшпинели Алапаевского массива или хромититов Ключевского массива.

К сожалению, мы пока не располагаем данными по составу хромшпинелида из серпентинитовых тел внутренних участков Мурзинско-Адуйского блока. По совокупности геологических признаков, условий нахождения, необычному осмий-рутениевому тренду вариаций состава гексагональных сплавов Os-Ir-Ru системы нельзя исключать из возможных коренных источников МПГ Нижнеалабашского лога известные (или нацело денудированные) мелкие тела ультрабазитов среди гранитогнейсов Мурзинского массива.

Выводы

1. В Нижнеалабашской россыпи зафиксирована ассоциация минералов легко- и тугоплавких ЭПГ, что сближает ее с нуралинско-верхнейвинским типом платиноидной минерализации и дает основание предполагать в качестве коренного источника МПГ хромититы зон перехода дунит-гарцбургитовых серий офиолитовых пород к полосчатым дунит-клинопироксенитовым.

2. Впервые выделен осмий-рутениевый тренд вариаций состава гексагональных сплавов Os-Ir-Ru системы. Типоморфное значение этого тренда остается пока не выясненным.

3. Проведенные исследования не позволяют однозначно определить источники МПГ в Нижнеалабашском логу. Компактность их нахождения при относительно высокой концентрации, вероятно, может быть связана с мелкими телами ультрабазитов, известными в Мурзинско-Адуйском гранитогнейсовом блоке. Для установления этого необходимы дополнительные исследования.

Благодарности

Исследование минералов из Алабашской россыпи выполнено при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект 12-И-5-2068), а изучение МПГ Верх-Нейвинского массива поддержано РФФИ (грант № 12-05-01166).

Литература

Баданина И.Ю., Малич К.Н., Мурзин В.В., Хиллер В.В., Главатских С.П. Минералого-геохимические особенности платиноидной минерализации Верх-Нейвинского дунит-гарцбургитового массива (Средний Урал, Россия) // Ежегодник-2012. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 160. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2013. С. 188–192.

Варламов Д.А., Мурзин В.В. Новые данные по минералам платиноидов из россыпей Верх-Нейвинского гипербазитового массива // Проблемы и перспективы современной минералогии (Юшкинские чтения-2014). Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. С. 69–70.

Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Неустроева И.И., Нестерова С.И. Распределение и формы нахождения ЭПГ в ультрамафитах и хромовых рудах альпинотипных комплексов Урала // Ежегодник-2007 / Институт геологии и геохимии УрО РАН. Информационный сборник научных трудов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2008. С. 299–307.

Высоцкий Н.К. Платина и районы ее добычи. Ч. 2. Петроград: КЕПС, 1923. С. 110–343.

Золов К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А. и др. Платинометальное оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург: УГСЭ, 2001. 199 с.

Кисин А.Ю. Коллекционные рубины участка «Алабашка» // Уральская минералогическая школа-2005. Мат-лы Всеросс. науч. конф. Екатеринбург: Изд. УГГУ, 2005. С. 109–113.

Кисин А.Ю., Мурзин В.В. Источники хромшпинелида в рыхлых отложениях участка «Алабашка» Мурзинско-Адуйского гранитогнейсового блока (в связи с находками минералов платиновой группы) // Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 161. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2014. С. 264–269.

Малич К.Н., Баданина И.Ю., Кнауф В.В., Мейзел Т. Минералого-геохимические ассоциации платиноидов дунит-гарцбургитовых и клинопироксенит-дунитовых массивов // Труды Института геологии и

геохимии УрО РАН. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2013. Вып. 160. С. 255–260.

Мурзин В.В., Суставов С.Г. Новые данные о минералах ряда лаурит–эрликманит и их мышьяковистых разновидностей // Доклады АН (Россия). 2000. Т. 370. № 3. С. 380–382.

Мурзин В.В., Суставов С.Г., Мамин Н.А. Золотая и платиноидная минерализация россыпей Верх-Нейвинского массива альпинотипных гипербазитов (Средний Урал). Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1999. 93 с.

Пушкарев Е.В. Ключевской офиолитовый массив на Среднем Урале // Офиолиты: геология, металлогения и геодинамика. Материалы международной научной конференции. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2006. С. 334–346.

Толстых Н.Д. Генезис ЭПГ минерализации в офиолитовых комплексах // Офиолиты: геология, металлогения и геодинамика. Материалы международной научной конференции. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2006. С. 309–313.

Чащухин И.С., Вотяков С.Л. Ультрамафиты Алапаевского массива (Средний Урал): петрология, геохимия, хромитоносность // Литосфера. 2012, № 4. С. 140–157.

Чащухин И.С., Булькин Л.Д., Чащухина В.А. О природе хромитового оруденения в породах дунит-клинопироксенитового комплекса офиолитов Среднего Урала // Ежегодник-2004 / Институт геологии и геохимии. Информационный сборник научных трудов. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. С. 353–358.

Чащухин И.С., Вотяков С.Л., Щанова Ю.В. Кристаллохимия хромшпинели и оксибарометрия ультрамафитов складчатых областей. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2007. 310 с.

Чащухин И.С., Мамина В.М., Сурганов А.В. и др. Закономерности состава акцессорной и рудообразующей хромшпинели в ультрамафитах Первомайского массива // Ежегодник-2003 / Институт геологии и геохимии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. С. 206–217.

Bird J.M., Bassett W.A. Evidence of a deep mantle history in terrestrial osmium-iridium-ruthenium alloys // Journal of Geophysical Research. 1980. V. 85. P. 5461–5470.

Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.W. Mineralogy and distribution of platinum-group mineral (PGM) placer deposits of the world // Exploration and Mining Geology. 1996. V. 5. P. 73–167.

Garuti G., Zaccarini F., Cabella R., Pushkarev E., Smirnov V. The first data about platinum-group minerals in chromitites of the Kluchevskoy ophiolite complex (Middle Urals) // Уральская летняя минералогическая школа-1999 «Под знаком платины». Екатеринбург: УГГГА, 1999. С. 129–132.

Harris D.C., Cabri L.J. Nomenclature of platinum-group-element alloys: review and revision // Can. Miner. 1991. V.29. Pt 2. P. 231–237.

Zaccarini F., Pushkarev E., Garuti G. Platinum-group element mineralogy and geochemistry of chromitite of the Kluchevskoy ophiolite complex, central Urals (Russia) // Ore Geology Reviews. 2008. V. 33. P. 20–30.