

**МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ЖЕЛЕЗО-ПЛАТИНОВЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ
ИЗ РОССЫПЕПРОЯВЛЕНИЙ БАССЕЙНА р. АНАБАР
(северо-восток Сибирской платформы)**

Е.В. Айриянц¹, С.М. Жмодик^{1,3}, П.О. Иванов², Д.К. Белянин^{1,3}, Л.В. Агафонов¹

¹ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

² *ОАО «Алмазы Анабара», 677000, Якутск, ул. Чернышевского, 6, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

Статья посвящена исследованию типохимических особенностей шлиховой платины из алмазоносных россыпей участка Маят-Водораздельный бассейна р. Анабар. Платина представлена в основном Fe-Pt твердыми растворами, относящимися к железистой платине рутений-родистой специализации (около 90 %) при небольшом присутствии палладисто-железистой и иридисто-железистой платины. Среди минералов элементов платиновой группы (ЭПГ) также установлены Os-Ir-Ru сплавы и чендеит. Подробно исследованы включения минералов ЭПГ, выявлены масштабы их распространения, взаимоотношения минеральных фаз между собой и их минеральный состав. Высокородистая рутенийсодержащая железистая платина содержит множество включений, относимых к системе Rh—S: Rh-содержащие тиошпинели ЭПГ, сульфиды и арсениды (Rh, Ru и Pt). Гораздо реже минеральные включения встречаются в низкородистой платине, как правило, образуя другие минеральные ассоциации. Составы минералов в системе Rh—S—Ru свидетельствуют о существовании протяженного изоморфного ряда Rh_3S_4 — Ru_3S_4 , в котором количество Ru_3S_4 достигает 15 ат. %.

Железистая платина, минеральные включения, боуит, кингстонит, миассит, рудоформирующая система.

**MINERAL INCLUSIONS IN Fe–Pt SOLID SOLUTION FROM THE ALLUVIAL ORE OCCURRENCES
OF THE ANABAR BASIN (northeastern Siberian Platform)**

E.V. Airiyants, S.M. Zhmodik, P.O. Ivanov, D.K. Belyanin, and L.V. Agafonov

This study is concerned with the typochemical features of heavy-concentrate platinum from diamond placers of the Mayat-Vodorazdel'nyi site in the Anabar River basin. Platinum occurs there as Fe–Pt solid solutions (ferroan platinum of Ru–Rh specialization, ~90%), as well as minor Pd- and Ir-ferroplatinum. Among PGE minerals, Os-Ir-Ru alloys and chengdeite are revealed. Inclusions of PGE minerals are thoroughly studied, and the scales of their spread, the composition of mineral phases, and the relations between them are determined. Ruthenium-containing high-Rh ferroplatinum bears a lot of inclusions of Rh–S composition: Rh-containing PGE thiospinels and sulfides and arsenides of Rh, Ru, and Pt. In low-Rh platinum, mineral inclusions are much scarcer and usually form other parageneses. The mineral compositions in the system Rh-S-Ru indicate the existence of a long isomorphous series Rh_3S_4 – Ru_3S_4 , with the content of Ru_3S_4 reaching 15 at. %.

Ferroan platinum, mineral inclusions, boweite, kingstonite, miassite, ore-forming system

ВВЕДЕНИЕ

Региональный ореол фоновой зараженности рыхлых кайнозойских отложений северо-востока Сибирской платформы шлиховыми золотом и минералами платиновой группы (максимально проявленный в четвертичном аллювии) известен давно. Ореол характеризуется резким доминированием пластинчатых выделений тонких и мелких фракций металлов, преобладанием весьма высокопробного золота и высокородистой железистой платины уникального, так называемого «вилюйского типа», который не имеет установленных коренных источников [Округин, 2000].

Проявления золота и платины в аллювии водотоков рассредоточены на обширной территории, включающей Вилюйскую синеклизу, восточный склон Анабарской антеклизы и Лено-Анабарский прогиб. Проявления локализованы в пределах выхода на поверхность отложений платформенного чехла — карбонатных нижнепалеозойских и терригенных мезозойских, и приурочены к погребенным выступам архейского кристаллического фундамента [Округин и др., 2009]. В последние годы золото и платина в

промышленных россыпных месторождениях алмазов Лено-Анабарской алмазоносной субпровинции (аллювиальных плейстоцен-голоценовых и плиоценовых эрозионно-карстовых долин), несмотря на убогие содержания (первые миллиграммы—десятки миллиграммов на кубометр песков), рассматриваются как ценные попутные компоненты, что в определенной мере стимулирует их детальное изучение.

Обширная территория распространения россыпей проявлений платины виллоевского типа и отсутствие однозначного решения вопроса их происхождения делают актуальными детальными исследованиями геохимической и минералогической специфики этих Fe-Pt соединений. Особого внимания заслуживают включения минералов ЭПГ, широко проявленные в железистой платине виллоевского типа. Масштабы их распространения, взаимоотношения минеральных фаз между собой и их состав свидетельствуют об интенсивности развития постмагматических процессов, которые определяются в первую очередь активностью S и As. Высокие содержания примесей в твердых растворах собственно платиновых минералов, обилие их полиминеральных сростаний с МПГ дают возможность оценить эволюцию многокомпонентных металлических систем. Типохимические особенности железо-платиновых соединений определяются составом и условиями эволюции материнских рудогенерирующих магматических систем, что позволяет использовать полученные данные при прогнозировании характера потенциальных коренных источников металла из россыпей.

МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования были взяты шлиховые пробы платины, предоставленные ОАО «Алмазы Анабара» по участку Маят-Водораздельный. Одна из проб взята из верхнечетвертичного аллювия руч. Тыйдах-Юрях, являющегося притоком р. Маят. Плотиком россыпи служат песчаники и алевролиты перми, в верхнем течении — долериты и базальты правобоярского комплекса триаса. Другие три пробы отобраны на участке Лог-405 в бассейне руч. Курунг-Юрях, левого притока р. Маят. Одна из них — шлик коры выветривания инфильтрационного типа с сидеритом предположительно мелпалеогенового возраста. Она была промыта на ГОУ класс –0.5 и обогащена на шлюзе мелкого наполнения, затем на лотке. Две другие пробы представляют собой концентрат из верхнечетвертичного аллювия. Плотиком россыпи послужили туфогенные образования правобоярской свиты триаса и плиоценовые осадки. В шликке установлены золото, МПГ и ассоциирующие с ними минералы тяжелой фракции.

Для исследования шлиховых проб были изготовлены препараты, сцементированные эпоксидным компаундом, содержащие мономинеральные фракции шлика. Поверхность препаратов полировалась на алмазных пастах. Предварительное минераграфическое оптическое изучение проводилось с использованием микроскопа AxioScope.A1 (Karl Zeiss) с увеличением в 25—1000 раз. Более детальное исследование платиновых минералов с количественным определением состава проводилось с помощью растровой электронной микроскопии (сканирующий микроскоп с термополевой эмиссией (TESCAN-MIRA 3LMU) с программным обеспечением INCA) (аналитик Н.С. Карманов, ИГМ СО РАН). В качестве проводящего покрытия использовалось напыление углерода толщиной 25 нм. Полученные результаты подвергались статистической обработке, проводился стехиометрический расчет состава обнаруженных минеральных фаз с определением их формульных коэффициентов.

ГЕОЛОГИЯ

Участок Маят-Водораздельный расположен в северной части Анабарского алмазоносного района и приурочен к северо-восточному склону Анабарской антеклизы в зоне перехода к Лено-Анабарскому прогибу. В геолого-тектоническом строении территории выделяются два структурных этажа — кристаллический фундамент и платформенный чехол. По системе субмеридиональных сбросов раннепротерозойского заложения фундамент разбит на блоки, кровля его ступенчато погружается в восточном направлении. Чехол состоит из трех структурных ярусов — рифейского, венд-нижнепалеозойского и верхнепалеозойско-мезозойского (рис. 1). Рифейский структурный ярус практически полностью перекрыт. Венд-нижнепалеозойский представлен терригенно-карбонатными породами венда и карбонатными породами кембрия. В пределах яруса отмечаются проявления основного магматизма молододуджинского и щелочно-ультраосновного с карбонатитами томторского комплексов. Верхнепалеозойско-мезозойский структурный ярус охватывает терригенные прибрежно-континентальные отложения перми, юры и мела. Пермские отложения прорываются правобоярским базальт-долеритовым комплексом раннего триаса, проявленным очень широко в виде даек, силлов и жерловых тел. В меньшей степени проявлены породы покрова базальтов и долеритов комагматичной ему вулканогенной правобоярской свиты. Также отмечаются проявления раннетриасового эбехайнского трахидолеритового комплекса. В его составе дайки и субвулканические тела трахидолеритов, монзонитов и трахиандезитов. Осадочные и интрузивные породы перекрыты третично-четвертичными отложениями [Округин, 2000; Округин и др., 2009].

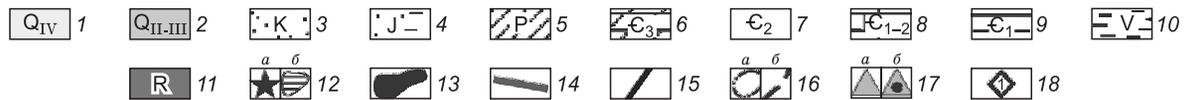


Рис. 1. Схема распространения платиноносных россыпей в бассейне р. Анабар, по данным [Округин и др., 2009].

1, 2 — четвертичные отложения; 3–5 — верхнепалеозойско-мезозойский структурный ярус, терригенные прибрежно-континентальные отложения; 6–10 — венд-нижнепалеозойский структурный ярус, терригенно-карбонатные породы; 11 — рифейский структурный ярус; 12 — кимберлитовые (а) и карбонатитовые (б) тела; 13 — пермско-триасовые трапные тела; 14 — дайки долеритов правобоярского комплекса; 15 — разломы; 16 — интрузивы (а) и изогипсы поверхности фундамента по геофизическим данным (б); 17 — россыпи с родистой платиной (а) и в ассоциации с палладистым золотом (б); 18 — участки отбора исследуемых шлихов: 1 — р. Тыйдах-Юрях, 2, 3 — Лог-405 (2 — шлиховая проба, 3 — концентрат).

Россыпная золото-платиновая минерализация достоверно установлена в выполняющих эрозионно-карстовые полости плиоценовых осадках и четвертичном аллювии. Наличие золота и платины в латеритных и инфильтрационных корках выветривания мел-палеогенового (?) возраста, установленное по данным валового опробования, требует проверки. Эти образования в верхних горизонтах несут следы переотложения и перекрываются золото-платиноносным плиоценовым и верхнечетвертичным аллювием. Широко развиты дизъюнктивные нарушения, представленные тремя различными системами. Одна представлена ортогональными глубинными разломами, заложенными в раннем протерозое, проявляющимися в рифее и палеозое и участвовавшими в формировании Уджинского поднятия. Другая — Молодо-Попигайская зона глубинных разломов северо-западного простирания — была заложена в докембрии, активизировавшаяся в мезозое при внедрении многочисленных тел правобоярского и эбехайнского трахидолеритовых комплексов, протяженные дайки которых приурочены к молодому-попигайской системе разломов. Третья — разломные зоны, проявленные в чехле, генетически относящиеся к сбросам, взбросодвигам и сопровождающиеся тектоническими брекчиями, окварцеванием без магматических проявлений.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИНЕРАЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ (МПГ)

Среди минералов платиновой группы наиболее распространены железо-платиновые соединения, которые изучены в шлиховых концентратах трех различных объектов: большеобъемной валовой пробы ($V = 2.9 \text{ м}^3$) коры выветривания инфильтрационного типа с сидеритом; концентрата из аллювия ручья, дренирующего участок Лог-405 и из аллювия руч. Тыйдах-Юрях, дренирующего триасовые траппы и пермские континентальные песчаники (см. рис. 1).

Зерна исследованных минералов платины имеют уплощенную, лепешковидную форму, иногда слаботаблитчатую с окатанными границами и хорошо отполированной поверхностью. Размер зерен составляет в среднем 0.15—0.25 мм. Толщина зерен платиновых минералов независимо от размеров не превышает 0.08—0.10 мм. По крупности зерен их можно отнести к тонкому классу [Шило, 2002]. В аншлифах платина равномерно окрашена, серебристо-белого цвета с желтоватым оттенком и с высокой отражательной способностью. Установлено, что платина содержит в своем составе Fe от 4.39 до 13.63 мас. % (табл. 1, рис. 2) и соответствует стехиометрии Pt_3Fe (90 % от всей массы МПГ). Как было показано в работах предыдущих исследователей [Округин и др., 2009], основная масса МПГ в россыпях р. Анабар представлена железистой платиной с неупорядоченной структурой, только изредка встречаются зерна с упорядоченной решеткой, характерной для интерметаллида — изоферроплатины. Для исследуемой железистой платины характерно присутствие Rh (до 11.26 мас. %) и Ru (до 6 мас. %). Наблюдаемый единый тренд Rh в Fe-Pt сплавах, обусловленный непрерывным рядом твердых растворов, осложнен бимодальным характером распределения (не связанным с местом отбора проб шлихового материала) (рис. 3). По мнению авторов, такой характер распределения не следует интерпретировать как случайный, но его генетической трактовки пока нет. В целях сохранения информативности мы предлагаем рассматривать характеристики исследуемого материала с учетом содержания родия в железистой платине. Таким образом, всю изученную железистую платину можно разбить на две группы. Первая группа (59 % от всей платины) — высокородистая железистая платина со средним содержанием Rh — 7.85 мас. %. Вторая, менее представительная группа, с более низким средним содержанием Rh — 1.92 мас. %. С повышением Rh отмечается и незначительное увеличение Fe и Ru до 12 мас. %, что особенно характерно для низкородистой железистой платины второй группы. Коэффициент корреляции между их содержаниями соответствует +0.4, что отмечалось также для вильнойской платины предыдущими исследователями [Округин, 2000]. Высокие концентрации халькофильных элементов (Rh и Ru) в Fe-Pt природных соединениях могут свидетельствовать о низкой сернистости коренных руд [Толстых, Кривенко, 1997; Округин, 2000]. Кроме преобладающей в шлихе рутениево-родистой железистой платины отмечаются в незначительном количестве зерна платины с примесью Ir (до 9.7 %) и Pd (до 5.9 %). При этом надо отметить, что концентрирование Rh, Ir и Pd происходит в разных зернах Fe-Pt твердых растворов (см. рис. 2, б). Так, высокие значения Pd фиксируются в железистой платине с низкими значениями Ir и Rh. Наличие палладиевого тренда в Fe-Pt сплавах с низкими содержаниями Rh, Ru, Ir и Os отмечалось в работе [Округин и др., 2009]. Это справедливо для каждого из этих элементов. Такое рас-

Таблица 1. Состав железистой платины

Параметр	Fe	Ni	Cu	Ru	Rh	Pd	Pt	Ir	Os
Железистая платина (Fe-Pt), N = 105									
Сред. значение	10.41	0.05	0.42	1.88	5.46	0.57	81.15	0.06	0.01
Станд. отклонение	1.41	0.15	0.53	1.29	3.30	1.07	4.49	0.28	0.06
Мин. значение	4.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	72.25	0.00	0.00
Макс. значение	13.63	0.89	3.64	6.00	11.26	5.96	94.94	2.00	0.66
Низкородистая (Fe-Pt), N = 41									
Сред. значение	9.99	0.04	0.62	1.17	1.92	0.93	85.30	0.08	0.00
Станд. отклонение	1.45	0.11	0.72	1.25	1.43	1.59	3.16	0.34	0.00
Мин. значение	4.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	77.54	0.00	0.00
Макс. значение	12.87	0.50	3.64	6.00	4.37	5.96	94.94	2.00	0.00
Высокородистая (Fe-Pt), N = 64									
Сред. значение	10.68	0.06	0.30	2.34	7.78	0.33	78.46	0.04	0.01
Станд. отклонение	1.33	0.16	0.30	1.09	1.66	0.37	2.88	0.22	0.08
Мин. значение	6.71	0.00	0.00	0.00	4.65	0.00	72.25	0.00	0.00
Макс. значение	13.63	0.89	0.82	4.73	11.26	1.42	87.97	1.54	0.66

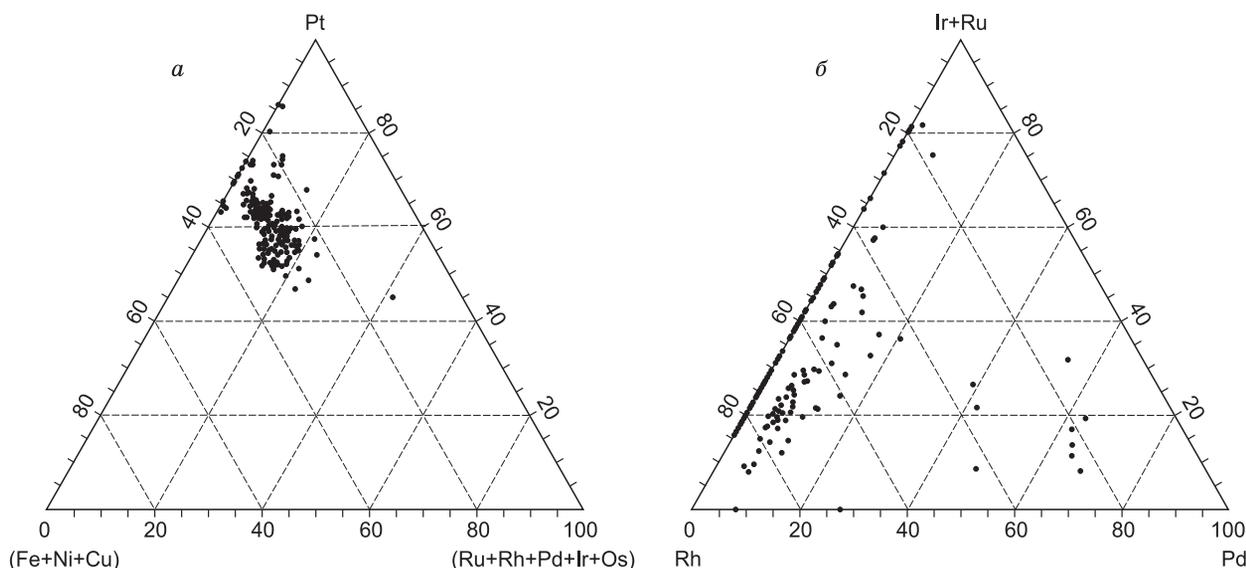


Рис. 2. Тройные диаграммы состава железо-платиновых сплавов.

a — по основным компонентам; *б* — по изоморфным примесям (ат. %).

пределение может указывать на различные источники происхождения Fe-Pt сплавов и (или) разные стадии развития рудообразующей системы [Slansky et al., 1991; Johan et al., 2000; Tolstykh et al., 2002a].

В состав платины входит примесь Cu (ср. 0.42 мас. %), крайне редко Ni (ср. 0.16 мас. %). Существенного изменения химического состава внутри зерен не фиксируется. Для общей выборки по всем проанализированным зернам железистой платины наблюдаются значимые отрицательные парные корреляции Pt с Rh, Ru и Fe, что позволяет говорить об изоморфном замещении Pt на Rh, Ru и Fe (табл. 2). Отмечаемые положительные парные корреляции Pd с Cu и Ru свидетельствуют о совместном накоплении этих элементов и вхождении их в структуру Fe-Pt твердых растворов. Однако внутри выделенных групп картина несколько иная. Для высокородистой платины наблюдается сильная отрицательная корреляция Pt с Rh, Fe, Cu; в низкородистой — с Ru, Rh.

В основном платина имеет однородное строение. Однако в матрице низкородистой и обогащенной рутением железистой платины (табл. 3, ан. 18а, 1) из аллювия руч. Тыйдах-Юрях встречаются интерметаллиды Os-Ir-Ru (рис. 4). Пластинчатые включения Os-Ir-Ru сплавов по составу соответствуют

Таблица 2. Коэффициенты парных корреляций в Fe-Pt сплавах

Общее $N = 105$	Fe	Cu	Ru	Rh	Pd	Pt		
Fe	1	0.02	-0.08	0.35	0.09	-0.47		
Cu	0.02	1	-0.22	-0.17	0.13	0.06		
Ru	-0.08	-0.22	1	0.49	-0.12	-0.59		
Rh	0.35	-0.17	0.49	1	-0.07	-0.93		
Pd	0.09	0.13	-0.12	-0.07	1	-0.04		
Pt	-0.47	0.06	-0.59	-0.93	-0.04	1		
$N = 41 \setminus 64$		Высокородистая железистая платина						
Низкородистая железистая платина	Fe		0.18	-0.30	0.28	0.07	-0.41	Fe
	Cu	-0.01		-0.15	0.18	0.17	-0.43	Cu
	Ru	-0.16	-0.14		0.05	-0.11	-0.29	Ru
	Rh	0.17	-0.18	0.49		0.14	-0.80	Rh
	Pd	0.14	0.09	-0.09	-0.11		-0.24	Pd
	Pt	-0.47	0.02	-0.58	-0.78	-0.17		Pt
		Fe	Cu	Ru	Rh	Pd	Pt	

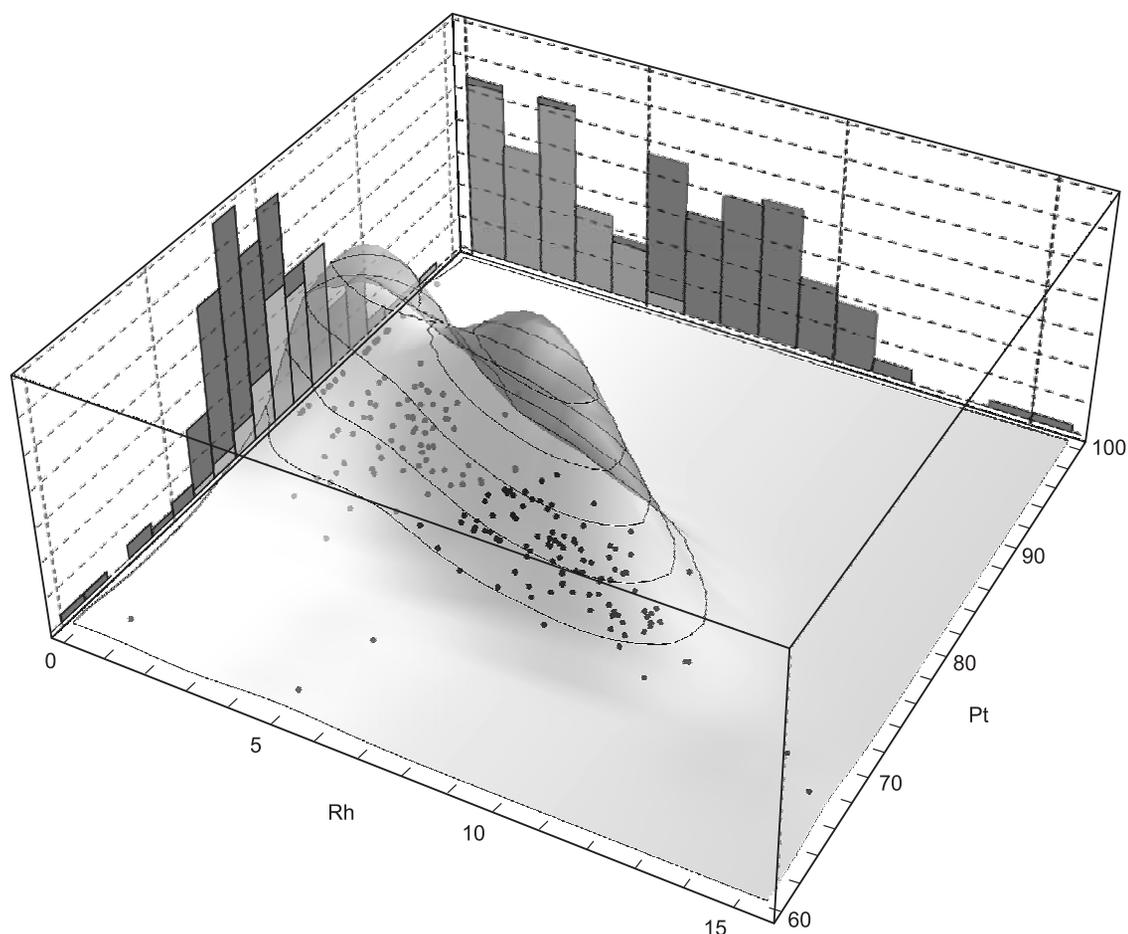


Рис. 3. Бинарный график распределения родия и платины в железо-платиновых твердых растворах (мас. %).

Точками показаны две выделяемые группы (светлые — низкорудистая железистая платина, темные — высокорудистая).

рутениею и высокорутенистому осмию (рис. 5). Такие составы Os-Ir-Ru сплавов, расположенные в пределах рутениевого тренда, характерны для шлиховых ореолов, связанных с офиолитовыми источниками [Tolstykh et al., 2002a]. Иногда включения Os-Ir-Ru сплавов замещаются вторичными минералами — лауридом, гексаферрумом, состав которых приведен в табл. 3. При этом центральная часть представляет собой реликты первичного Os-Ir-Ru соединения в виде прерывистой цепочки мелких зерен (см. рис. 4, а). Гексаферрум довольно часто встречается в Fe-Pt твердых растворах в виде самостоятельных включений. Присутствие внутри платиновой массы твердого раствора переменного Os-Ir-Ru состава в виде порфиробластов указывает на то, что они выделялись из расплава перед началом кристаллизации основной платиновой массы [Высоцкий, 1923]. В шлиховом материале были обнаружены и самостоятельные зерна рутениридосмина, при этом они составили не более 3—4 % от всех МПГ. Наиболее часто они встречаются в шлиховом материале с руч. Тыйдах-Юрях. Установлен редкий минерал иридия — **чендеит** Ir_3Fe (рис. 6). Размер его достигает 120 мкм. Зерно имеет уплощенную форму со сколовыми краями. Цвет ярко-белый с желтоватым оттенком. Имеет высокую отражательную способность. В состав в качестве примесей входят (мас. %): Ru — 1.85, Rh — 1.17, Os — 0.7, Pt — 7.3.

МИНЕРАЛЫ ВКЛЮЧЕНИЙ

Железо-платиновые твердые растворы насыщены включениями ЭПГ минералов (в 27 % зерен от общего числа). Наиболее часто (в 40 % от всех зерен) они отмечаются в шлиховой платине из аллювия руч. Тыйдах-Юрях. Масштабы их проявления зависят от интенсивности развития постмагматических процессов, которые определяются в первую очередь активностью S, As, Te. Преобладающая часть ми-

Таблица 3. Состав включений Os-Ir-Ru, лаурита и гексаферрума в матрице низкородистой платины из аллювия руч. Тыйдах-Юрях (мас. %)

Точка анализа	S	Fe	Ru	Rh	Os	Ir	Pt	Сумма	Минерал
Зерно 18а									
1	—	9.12	10.01	2.5	—	0	77.08	99.71	Fe-Pt
2	40.02	—	57.22	—	1.1	0	—	98.34	Лаурит
3	37.02	0.19	55.45	0	2.85	1.5	2.06	99.07	»
4	40.01	—	58.22	—	—	—	—	98.23	»
5	—	0.13	53.8	—	19.49	17.11	10.24	100.77	Ir-Os-Ru
6	—	—	51.39	—	22.27	15.06	10.9	99.62	»
Зерно 18б									
1	37.54	1.2	55.01	—	4.01	—	2.15	99.91	Лаурит
2	38.45	—	56.2	—	0	0	2.34	96.99	»
3	—	—	22.29	—	58.69	18.19	—	99.17	Ir-Ru-Os
4	—	0.86	25.74	—	48.83	20.7	3.98	100.11	»
5*	4.14	0.93	14.36	—	64.19	18.39	—	102.01	»
6	32.25	—	56.81	—	6.52	—	4.03	99.61	Лаурит
7	—	21.7	11.99	—	38.61	24.22	—	96.52	Гексаферрум

Примечание. Точки анализов совпадают с обозначениями на рис. 4, а (зерно 18а) и 4, б (зерно 18б). Здесь и далее: прочерк — не определялось, 0 — не обнаружено.

Смесь Os-Ir-Ru и RuS₂.

нералов из включений представлена сульфидами, сульфоарсенидами и теллуридами платиновых металлов: боуитом (Rh, Ir, Pt)₂S₃, кингстонитом (Rh, Ir, Pt)₃S₄, миасситом Rh₁₇S₁₅, лауритом RuS₂, купрородситом CuRh₂S₄, маланитом Cu(Pt, Ir)₂S₄, феррородситом (Fe, Cu)(Rh, Ir, Pt)₂S₄, василитом (Pd, Cu)₁₆S₇, куперитом PtS, родарсенидом (Rh, Pd)₂As, платарситом (Pt, Rh, Ru)AsS, теллурупалладинитом Pd₉Te₄, мончеитом (Pt, Pd)(Te, Bi)₂. Их соотношение представлено на рис. 7. Состав и диапазон изменения их химических особенностей являются информативными для оценки специализации рудоформирующей системы. Встречаются как мономинеральные, так и сложные многофазные скопления, которые представляют собой микропарагенезисы минералов ЭПГ и сульфидов других металлов, локализованные в

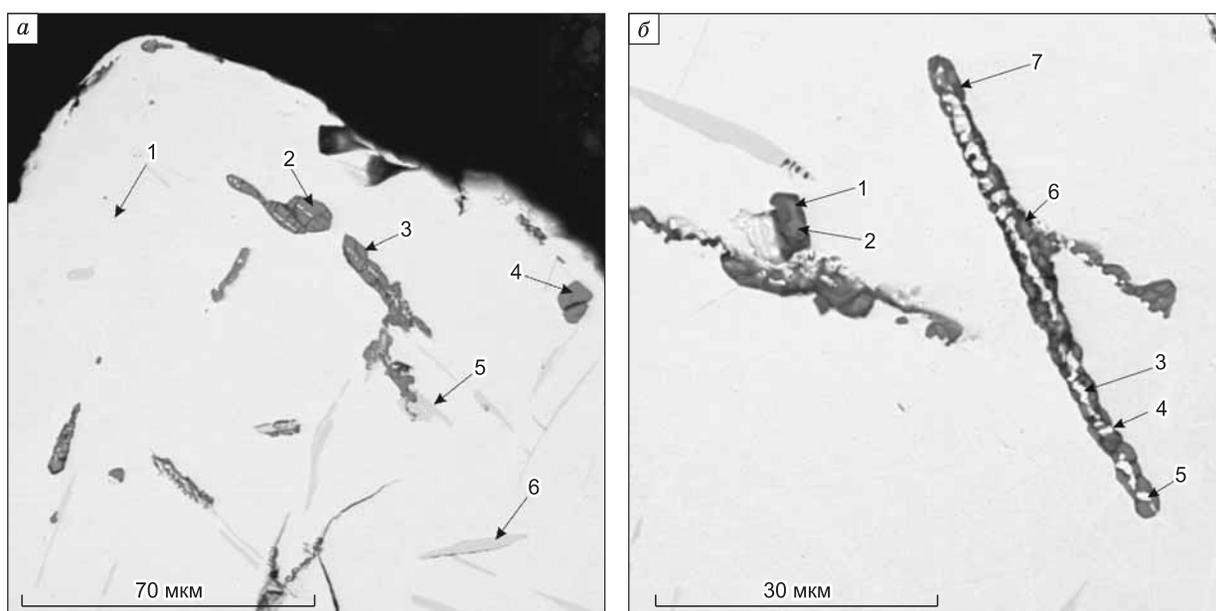
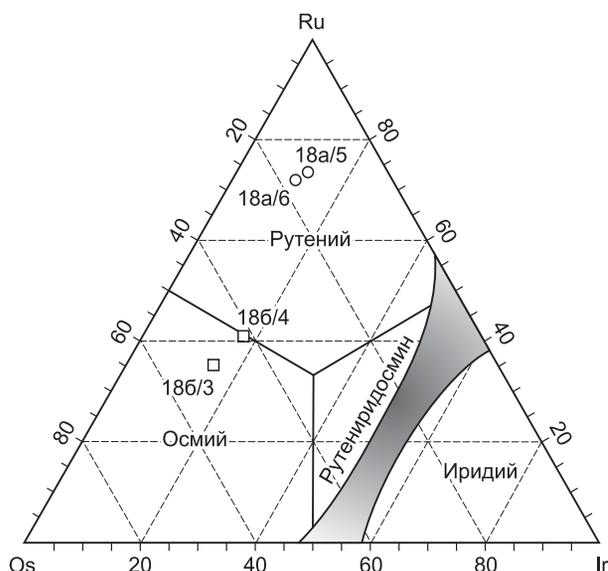


Рис. 4. Включения Os-Ir-Ru сплавов в рутенистой низкородистой железистой платине, частично замещенные вторичным лауритом и гексаферрумом. Аллювий руч. Тыйдах-Юрях.

Цифры обозначают номера спектра, анализы по которым приведены в табл. 3. а — зерно 18а; б — зерно 18б.

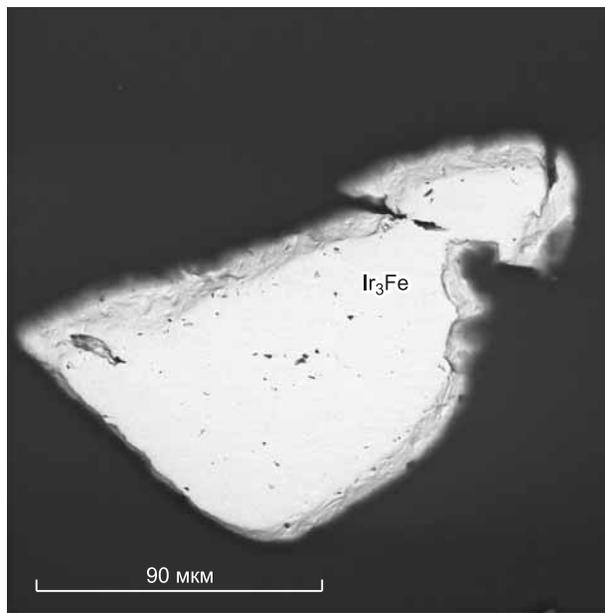
Рис. 5. Тройная диаграмма состава включений Os-Ir-Ru сплавов в рутенистой низкородистой железистой платине (ат. %).



пустотах кристаллов магматического происхождения. Включения наиболее часто находятся в железистой платине, относимой к высокородистой группе (в 84 % случаев). Их состав, как правило, коррелируется с преобладающей примесью в Pt-Fe соединениях. В высокородистой платине включения выполнены минералами, относящимися к системе Rh—S: Rh-содержащим тиошпинелям ЭПГ, сульфидам и арсенидам (Rh, Ru, Pt). Гораздо реже можно обнаружить минеральные включения в низкородистых сплавах. Включения в них характеризуются специфическим составом — в них практически отсутствуют минеральные фазы, в состав которых входил бы Rh (доля их составляет менее 15 %), в то время как в них присутствуют минералы других ЭПГ. В основном это сульфиды Ru, теллуриды Pd и сульфоарсениды Pt.

Наиболее подробно стоит остановиться на целой группе минеральных включений, относимых к системе Rh—S: боуиту Rh_2S_3 , кингстониту Rh_3S_4 и миасситу $Rh_{17}S_{15}$. Присутствие родийсодержащих сульфидных фаз в Fe-Pt сплавах вилюйского типа отмечалось в работах предыдущих исследователей [Округин и др., 2009], однако из-за незначительного размера включений количественный анализ их не проводился. Исследование на сканирующем микроскопе с термополевой эмиссией (TESCAN-MIRA 3LMU) с высокой разрешающей способностью позволило установить химический состав подобных включений. Анализ полученных данных, проведение стехиометрического расчета и получение формульных коэффициентов позволило разделить эти минеральные фазы между собой. Следует отметить, что при определении состава зерен боуита и кингстонита с размерами менее 10 мкм возникает систематическая ошибка, связанная с влиянием вмещающей их платины.

Боуит (Rh, Ir, Pt) $_2S_3$ в одном случае образует в железистой платине мелкое единичное включение. В другом — ассоциирует с родарсенидом (рис. 8, а). Размер зерна 6—8 мкм. Следует отметить необычность состава изученного минерала — присутствие в нем Ru 4.59 мас. %; Fe до 3.76 мас. % и полное отсутствие Ir, характерного для боуита (табл. 4, обр. 14-15). В литературе похожий боуит с содержанием Ru до 7—8 мас. % описывается для россыпных месторождений Эквадора [Weiser, Schmidt-Thome, 1993].



Кингстонит (Rh, Ir, Pt) $_3S_4$ является одним из редких сульфидов родия. В отраженном свете он обладает светло-буровато-серым цветом с металлическим блеском. В исследованной платине обнаружено большое количество включений минерала, близкого к кингстониту по стехиометрическому соотношению элементов [Harris, Cabri, 1991]. Важным отличием является вхождение в структуру Ru и отсутствие Ir (см. табл. 4). Существующие погрешности при определении химического состава кингстонита, возможно, обуславливаются его размерами и тесным срастанием с другими минералами. Так, например, несколько повышенное содержание Fe, возможно, обусловлено пиритом (см. рис. 8, б). Установленная минеральная фаза, близкая к кингстониту, формирует мономинеральные

Рис. 6. Зерно чендеита Ir_3Fe из шлиха коры выветривания.

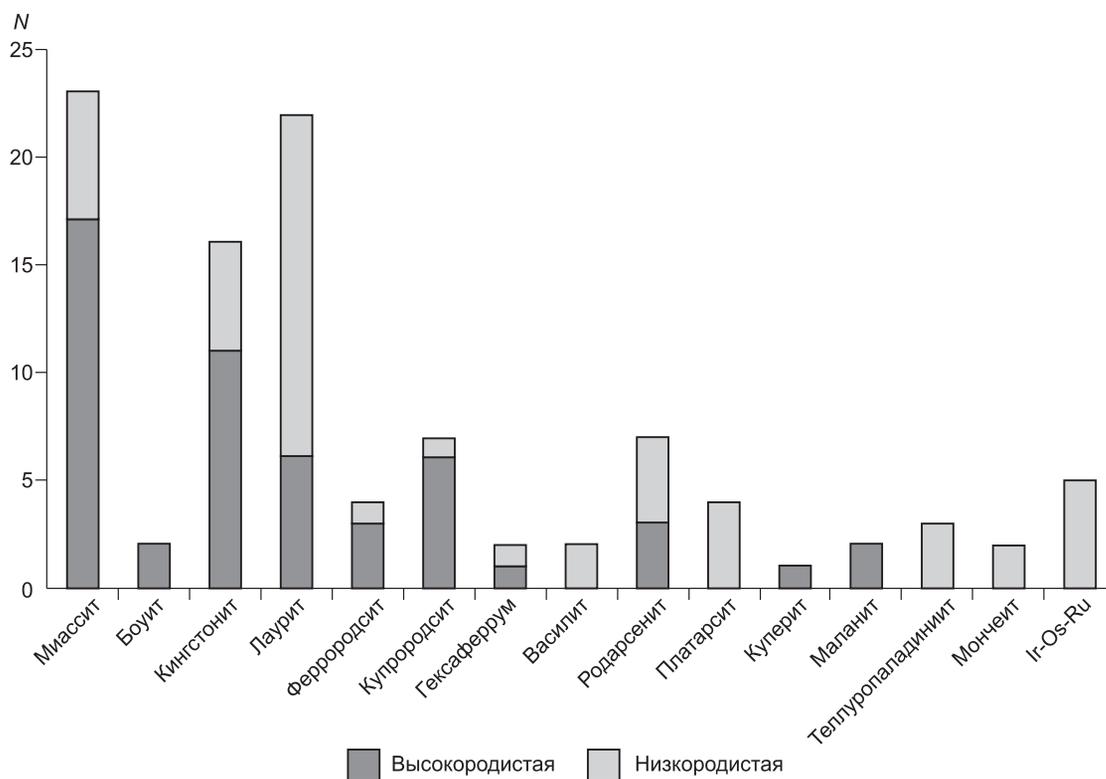


Рис. 7. Гистограмма частоты встречаемости различных минеральных фаз ЭПГ во включениях в железистой платине.

На гистограмме указано суммарное количество замеров включений, выполненных определенной минеральной фазой, разными цветами отмечена доля вклада железистой платины разных групп. Например, миассит — было обнаружено 33 включения, из них 30 — в высокородистой железистой платине и 3 — в низкородистой.

включения неправильной формы, но чаще встречается в ассоциации с другими сульфидами. В литературе он описывается как типичный минерал включений в железисто-платиновых сплавах ультрамафических пород и россыпей платинового месторождения Юбдо (провинция Уоллега, Эфиопия) в ассоциации с Pt-Fe соединениями, осмием, лауритом, боуитом, феррородситом и купрородситом [Кудряшова, Смольянинова, 2006].

Третий представитель сульфида родия редкий и относительно новый минерал — **миассит (прас-соит) $Rh_{17}S_{15}$** . Он является одним из основных сульфидов, слагающих включения. В отраженном свете на фоне платиновой матрицы он имеет светло-серый, чуть голубоватый оттенок. Полученные замеры химического состава и сделанные на их основе расчеты формульных количеств сопоставимы с литературными данными других исследователей (табл. 5). Минерал характеризуется атомным соотношением Rh/S, близким к 1/1. Обычно он образует мономинеральные включения как мелкие (2—5 мкм), так и более крупные до 20—30 мкм (см. рис. 8, в, з). Реже ассоциирует с сульфидами: халькопиритом, пиритом, пентландитом и лауритом. В составе отмечается примесь Ru (ср. сод. 2.7 мас. %), Fe, Cu (1.81 мас. %). Полученные данные соотносятся с результатами, описанными в литературе [Feather, 1976; Cabri et al., 1981; Толстых, Кривенко, 1994; Бритвин и др., 2001]. Прослеживается интересная закономерность: миассит с максимальным содержанием Rh не формирует сростаний с любыми другими Rh-содержащими сульфидами или сульфоарсенидами. Вероятно, это связано с тем, что весь имеющийся в системе Rh связывается в миассите.

Одной из часто встречаемых минеральных фаз является сульфид Ru — **лаурит RuS_2** . Он, как правило, формирует самостоятельные множественные мелкие включения (3—4 мкм), входит в состав сложных многофазных сростаний с сульфидами Rh, купрородситом, пиритом (см. рис. 8, д). Как уже отмечалось ранее, в шлиховой платине из руч. Тыйдах-Юрях лаурит совместно с гексаферрумом образует каемки обрамления в многофазных вытянутых, пластинчатых включениях (см. рис. 4) Os-Ir-Ru сплавов. Химической особенностью лаурита является частое присутствие в небольшом количестве Rh и Pt в его составе (до 5.5 мас. % и до 3.2 мас. % соответственно). Отмечается примесь Fe (ср. сод.

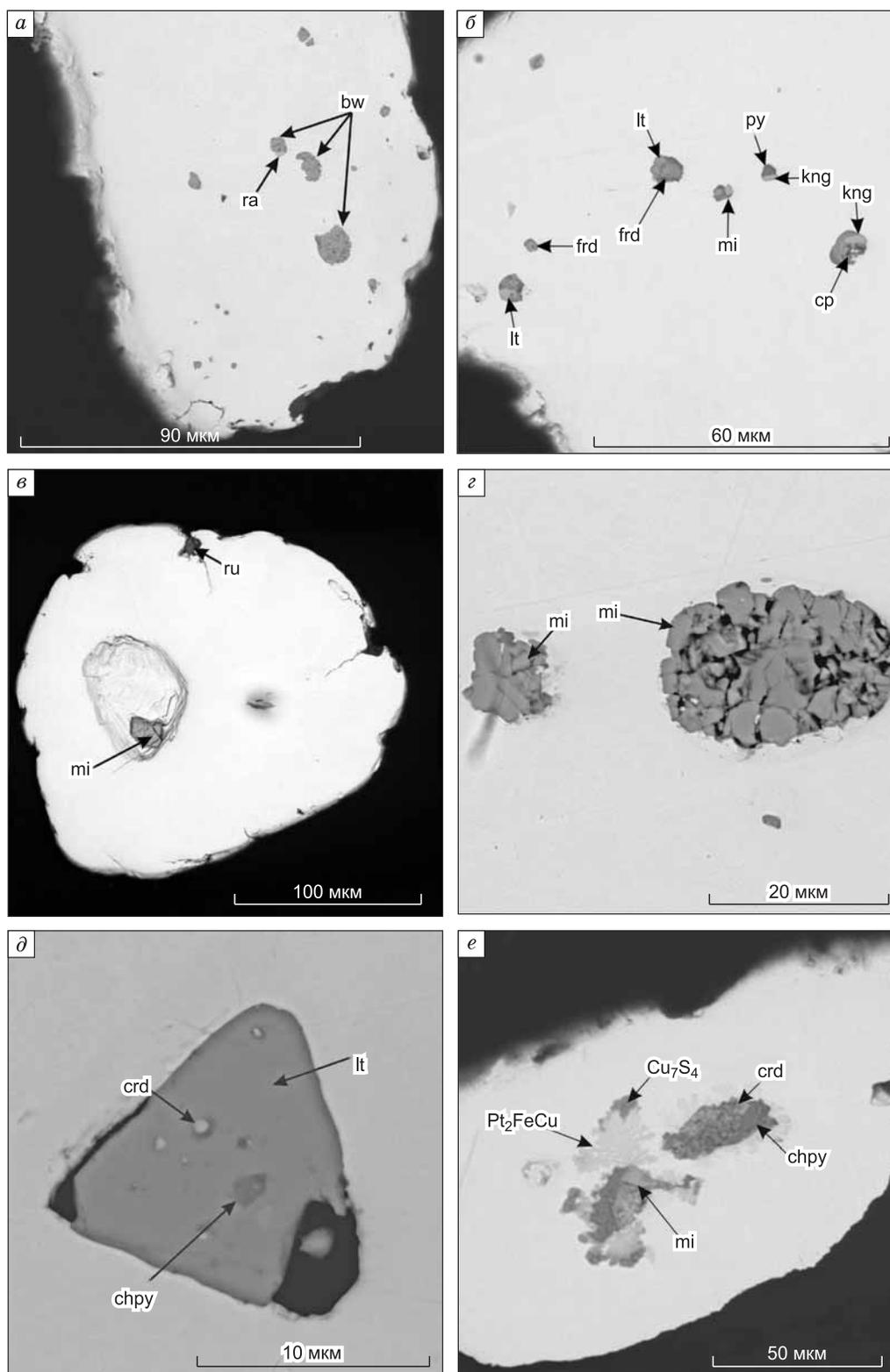


Рис. 8. Включения в железистой платине.

a — боюита и родарсенида (светло-серое); *б* — лаурита, куперита, миассита, феррородсита, кингстонита и пирита; *в* — включение миассита, в краевой части — рутила; *г* — полизерновые включения миассита; *д* — многофазное включение, выполненное лауритом, купрородситом и халькопиритом; *е* — халькопирита, купрородсита и анилита Cu_7S_4 . Дендритовидные выделения туламинита Pt_2FeCu . bw — боюит $(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_3$; ra — родарсенид $(\text{Rh}, \text{Pd})_2\text{As}$; lt — лаурит RuS_2 ; mi — миассит $\text{Rh}_{17}\text{S}_{15}$; kng — кингстонит $(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_3\text{S}_4$; frd — феррородсит $(\text{Fe}, \text{Cu})(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$; cp — куперит PtS ; py — пирит FeS_2 ; ru — рутил TiO_2 ; crd — купрородсит CuRh_2S_4 ; chpy — халькопирит CuFeS_2 .

Таблица 4.

Химический состав боуита и кингстонита

Химический состав, мас. %															
Минерал	Боуит	Кингстонит													
	14-15*	14-25	16-16	16-15	17-20	17-31	14-9-2	14-9-4	14-9-5	14-28	17-3-4	17-22-1	17-17a-2	17-17a-4	17-17a-5
Ru	4.59	14.06	20.95	0	0	7.43	12.54	18.11	24.65	10.30	12.52	13.18	16.17	14.70	16.10
Rh	49.9	44.88	40.74	59.2	57.04	55.11	45.41	41.23	35.16	50.02	46.50	48.11	43.65	48.05	46.81
Pt	2	2.28	5.83	2.5	3.33	0	2.70	2.28	4.41	2.60	5.11	2.24	5.06	0	0
Fe	3.59	2.52	1.06	4.48	0	0.85	2.05	1.68	2.08	3.75	2.66	3.78	2.05	2.98	2.32
Ni	3	2.86	1.76	2.37	5.24	2.69	3.46	3.55	2.96	1.74	1.70	1.29	2.36	2.67	2.18
Cu	1.1	2.45	0.43	1.53	1.68	1.81	1.22	1.04	0.60	2.20	0	1.40	1.61	1.59	1.40
As	0	0	0	0	0	0	0.29	0	0.29	0	0	0.23	0.25	0	0
S	33.1	29.05	27.9	27.99	26.99	26.99	28.93	28.99	29.71	30.99	27.93	28.99	26.96	27.83	27.88
Сумма	97.28	98.1	98.67	98.07	94.28	94.88	96.60	96.88	99.86	70.61	96.42	99.22	98.11	97.82	96.69
Формульные количества															
Минерал	5 атомов	7 атомов на форм. ед.													
	14-15*	14-25	16-16	16-15	17-20	17-31	14-9-2	14-9-4	14-9-5	14-28	17-3-4	17-22-2	17-17a-2	17-17a-4	17-17a-5
Ru	0.13	0.6	0.93	0	0	0.33	0.54	0.78	0.42	0.42	0.56	0.56	0.72	0.63	0.70
Rh	1.42	1.88	1.78	2.51	2.54	2.43	1.94	1.75	1.46	2.00	2.04	2.01	1.91	2.04	2.01
Pt	0.03	0.05	0.13	0.06	0.08	0	0.06	0.04	0.10	0.05	0.12	0.05	0.12	0	0
Fe	0.19	0.19	0.09	0.35	0	0.07	0.16	0.13	0.16	0.28	0.22	0.29	0.17	0.23	0.18
Ni	0.15	0.21	0.13	0.18	0.41	0.21	0.26	0.26	0.22	0.12	0.13	0.09	0.18	0.20	0.16
Cu	0.05	0.17	0.03	0.1	0.12	0.13	0.08	0.07	0.04	0.14	0.00	0.09	0.11	0.11	0.10
Сумма катионов	1.97	3.1	3.09	3.19	3.15	3.17	3.04	3.06	3.01	3.17	3.06	3.10	3.20	3.21	3.15
S	3.03	3.9	3.91	3.81	3.85	3.83	3.96	3.96	2.83	3.98	3.94	3.89	3.78	3.79	3.84
As	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0.02	0	0	0.01	0.02	0	0
Сумма анионов	3.03	3.9	3.91	3.81	3.85	3.83	3.98	3.96	3.99	3.98	3.94	3.90	3.80	3.79	3.84

Примечание. Минеральные включения в железо-платиновых твердых растворах из россыпей проявлений бассейна р. Анабар (северо-восток Сибирской платформы).

* Номер образца.

2.89 мас. %), Ni и Cu. Родийсодержащий лаурит описан во включениях в платине из золотоносных россыпей Бирмы [Hagen et al., 1990].

В исследованных Pt-Fe твердых растворах большую долю сульфидных включений составляют минералы, относящиеся к классу тиошпинелей. Платиновые тиошпинели как более ранние минералы, захваченные Fe-Pt соединениями, типичны для ферроплатиновых россыпей, связанных с концентрически-зональными дунит-пироксеновыми массивами уральского типа [Подлипский и др., 2007]. Наиболее часто встречается медно-родиевая тиошпинель **купорродсит** CuRh_2S_4 , которая выполняет мелкие мономинеральные включения в железистой платине (4—6 мкм), также ассоциирует в них с родарсенидом, боуитом, лауритом и халькопиритом (см. рис. 8, д). Размер зерен купорродсита разнообразен от мелких (2—3 мкм) до более крупных 9—10 мкм. В одном из зерен обнаружена интересная минеральная ассоциация, отражающая изменение химизма в первичной системе (Pt—Fe—Rh—Ru—Cu) и последовательность минералообразования. В процессе серпентинизации железистая платина замещается туламинитом Pt_2FeCu , образующим дендриты (см. рис. 8, е). Родий под воздействием обогащенных серой растворов «связывается» в миассите, а медь формирует целый ряд Cu-содержащих сульфидов — халькопирит, купорродсит, которые позднее при гипергенном преобразовании замещаются аниллитом (Cu_7S_4). Другие тиошпинели встречаются гораздо реже. Минеральная фаза, близкая к **маланиту** $\text{Cu}(\text{Pt}, \text{Ir}, \text{Rh})_2\text{S}_4$, обнаружена в виде единичного мономинерального включения (2.5 мкм) в шлиховой платине из руч. Тыйдах-Юрях (рис. 9, а). **Феррорродсит** $(\text{Fe}, \text{Cu})(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$ встречается в ассоциации с сульфидами (пирит, халькопирит, изокубанит) (см. рис. 9, б). По химическому составу тиошпинели отличаются высо-

Таблица 5. Состав миассита, результаты исследований (по 2 анализа из включений в платине из разных шлихов) и литературные данные

Элемент	Химический состав миассита и близких к нему минеральных фаз, мас. %																	
	[Бритвин и др., 2001]					[Feather, 1976]				[Cabri et al., 1981]		[Толстых, Кривенко, 1994]	Данные авторов					
Ru	0	0	0	1.80	0	8.50	4.50	3.80	5.60	0	0	1.49	7.72	0	2.20	0	0	0
Ph	59.30	56.50	61.80	58.90	59.90	65.70	54.90	71.70	53.20	29.90	30.10	64.04	56.90	65.20	67.30	63.90	62.50	59.90
Pd	7.40	7.00	5.60	6.50	5.60	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Os	0	0.30	0.40	0.70	0.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ir	0.30	0	0.40	0.60	1.00	0	0	0	0	5.10	5.30	2.38	0	0	0	0	0	0
Pt	8.80	11.00	5.80	3.40	5.20	3.00	13.30	2.50	11.20	1.50	1.50	0	4.54	5.69	2.40	4.20	4.44	3.35
Fe	1.10	0.80	1.30	1.80	2.00	0	1.80	0	3.10	13.10	13.50	0.99	4.24	2.54	1.65	0	3.07	4.26
Co	0	0	0	0	0	—	—	—	—	1.20	1.10	0	—	—	—	—	—	—
Ni	1.10	2.00	1.20	2.70	2.70	4.70	0.50	0.20	0.40	11.50	10.90	6.14	2.22	1.98	1.56	1.79	3.87	4.05
Cu	1.30	1.50	1.90	2.00	2.40	—	—	—	—	5.60	5.50	1.49	1.82	2.16	1.46	1.37	1.90	1.73
S	20.60	20.70	21.70	21.10	20.90	19.30	18.70	18.50	19.50	31.00	30.90	20.63	21.90	22.30	21.70	20.90	21.70	21.90
Se	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
As	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	99.90	99.80	100.10	99.50	100	101.20	93.70	96.70	93.00	99.00	98.80	97.20	99.39	99.92	98.26	95.46	97.49	95.28
Формульные количества (32 атома на форм. ед.)																		
Элемент	[Бритвин и др., 2001]					[Feather, 1976]				[Cabri et al., 1981]		[Толстых и др., 1994]	Данные авторов					
Ru	0	0	0	0.39	0	1.90	1.12	0.91	1.36	0	0	0.33	1.65	0	0.48	0	0	0
Ph	13.27	12.64	13.35	12.63	12.85	14.36	13.44	16.80	12.72	5.07	5.13	13.84	11.94	13.77	14.48	14.12	13.31	12.78
Pd	1.60	1.51	1.17	1.35	1.16	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Os	0	0.04	0.05	0.08	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ir	0.04	0	0.05	0.07	0.11	0	0	0	0	0.46	0.48	0	0	0	0	0	0	0
Pt	1.04	1.30	0.66	0.38	0.59	0.35	1.72	0.31	1.41	0.13	0.13	0	0.50	0.63	0.27	0.49	0.50	0.38
Fe	0.45	0.33	0.52	0.71	0.79	0	0.81	0	1.37	4.09	4.24	0.39	1.64	0.99	0.65	1.34	1.21	1.68
Co	0	0	0	0	0	—	—	—	—	0.36	0.33	0	—	—	—	—	—	—
Ni	0.43	0.78	0.45	1.02	1.02	1.80	0.21	0.08	0.17	3.42	3.26	2.33	0.82	0.73	0.59	0.69	1.45	1.51
Cu	0.47	0.54	0.66	0.69	0.83	—	—	—	—	1.54	1.52	0.52	0.62	0.74	0.51	0.49	0.66	0.60
Сумма катионов	17.30	17.15	16.91	17.33	17.39	18.44	17.30	18.10	17.03	15.07	15.09	17.69	17.17	16.87	16.99	17.13	17.12	16.95
S	14.82	14.89	15.07	14.55	14.41	13.56	14.69	13.91	14.97	16.93	16.91	14.31	14.83	15.13	15.01	14.87	14.88	15.05

ким содержанием Ru (до 11.2 мас. %) и присутствием незначительной примеси халькофильных элементов Fe и Ni. Ru-содержащий купорродсид описан во включениях в Fe-Pt сплавах из золотоносных россыпей Бирмы [Cabri et al., 1996].

К второстепенным сульфидам, встречающимся крайне редко во включениях, можно отнести **куперит PtS**. Формирует он мономинеральные включения неправильной формы (до 8 мкм) в Fe-Pt сплавах и находится в парагенезисе с кингстонитом в многофазном включении (см. рис. 8, б). Примеси в PtS незначительны и связаны с входжением в состав небольшого количества Rh, Ru, Fe, замещающих Pt.

В железисто-палладистой платине также обнаружены включения, выполненные редким минералом — **василитом (Pd,Cu)₁₆S₇**. Размер включения 4—5 мкм (см. рис. 9, в). Его состав отличают значительные примеси Cu, Fe, Ru и Pt (табл. 6). Похожий василит описан во включениях в Pt-Fe-Pd сплавах россыпи р. Пустая (Камчатка), связанной с апикальными частями ультраосновных интрузивов аляскинского типа [Tolstykh et al., 2000].

Класс арсенидов ЭПГ представлен **родарсенидом (Rh,Pd)₂As**. Он образует мелкие ангдральные (2—6 мкм) мономинеральные включения или замещает ранние сульфиды в ассоциации с купорродсидом, боуитом, развиваясь по краевой части (см. рис. 8, а). В составе родарсенида отмечаются примеси

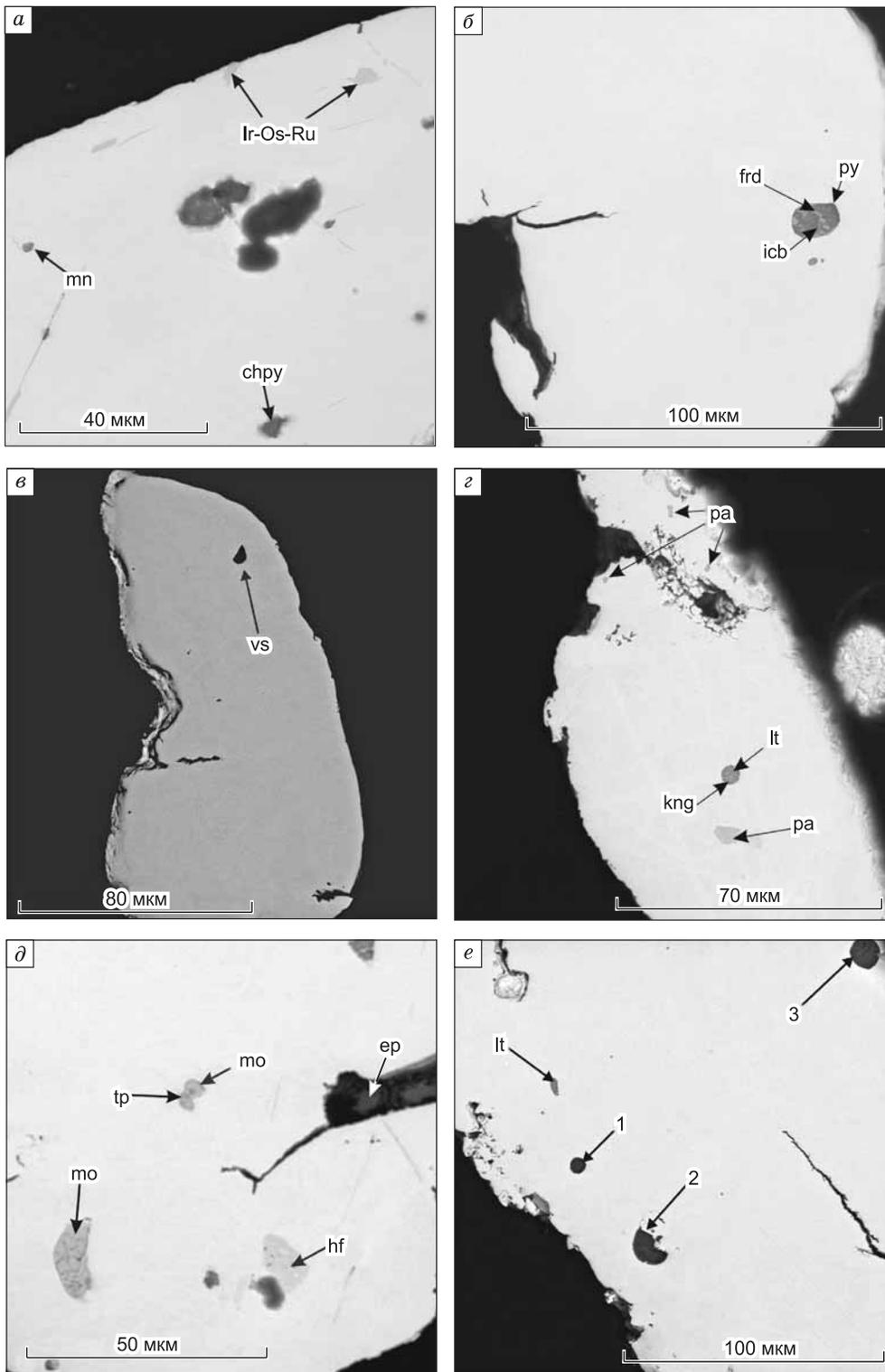


Рис. 9. Включения в железистой платине.

a — маланита, халькопирита и Ir-Os-Ru спава; *б* — многофазное включение, выполненное пиритом, изокубанитом, феррорродситом; *в* — включение василита в палладистой платине; *г* — платарсита, лаурита, кингстонита; *д* — мончеита, теллуropалладирита и гексаферрума, в краевой части — эпидота; *е* — расплавленные включения алюмосиликатного состава (1—3), составы которых приведены в табл. 8, и лаурита в иридо-железистой платине. mn — маланит $\text{Cu}(\text{Pt}, \text{Ir}, \text{Rh})_2\text{S}_4$; chpy — халькопирит CuFeS_2 ; frd — феррорродсит $(\text{Fe}, \text{Cu})(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_2\text{S}_4$; icb — изокубанит CuFe_2S_3 ; py — пирит FeS_2 ; vs — василит $(\text{Pd}, \text{Cu})_{16}\text{S}_7$; lt — лаурит RuS_2 ; kng — кингстонит $(\text{Rh}, \text{Ir}, \text{Pt})_3\text{S}_4$; pa — платарсит PtAsS ; mo — мончеит $(\text{Pt}, \text{Pd})(\text{Te}, \text{Bi})_2$; tp — теллуropалладинит Pd_9Te_4 ; hf — гексаферрум $(\text{Fe}, \text{Os}, \text{Ru}, \text{Ir})$; ep — эпидот $\text{Ca}_2\text{FeAl}_2[\text{SiO}_4][\text{Si}_2\text{O}_7]\text{O}[\text{OH}]$.

Таблица 6. Состав включений василита (Pd,Cu)₁₆S₇ в железистой платине, мас. %

Номер п/п	S	Fe	Ni	Cu	Ru	Rh	Pd	Pt	Te	Сумма	Формула
1	—	11.05	0.37	0.55	1.19	1.11	4.15	80.43	—	98.85	(Fe _{1.15} Ni _{0.04} Cu _{0.05}) _{Σ1.24} (Ru _{0.07} Rh _{0.06} Pd _{0.23} Pt _{2.40}) _{Σ2.76}
2	12.77	2.16	—	14.20	2.29	—	59.82	5.72	—	96.96	(Fe _{0.70} Cu _{4.03} Ru _{0.41} Pd _{10.14} Pt _{0.53}) _{Σ15.81} S _{7.19}
3	—	10.53	0.36	0.71	1.25	1.09	4.22	82.02	—	100.18	(Fe _{1.09} Ni _{0.04} Cu _{0.06}) _{Σ1.20} (Ru _{0.07} Rh _{0.06} Pd _{0.23} Pt _{2.44}) _{Σ2.80}
4	15.39	4.98	0	19.42	4.68	0	49.98	3.56	—	98.01	(Fe _{1.46} Cu _{4.99} Ru _{0.76} Pd _{7.67} Pt _{0.30}) _{Σ15.17} S _{7.83}
5	10.68	—	—	9.68	—	—	77.11	—	2.52	100	(Cu _{2.85} Pd _{13.55}) _{Σ16.40} (S _{6.23} Te _{0.37}) _{Σ6.60}
6	10.06	1.14	—	8	—	0.06	65.26	16.43	0.57	101.52	(Fe _{0.40} Cu _{2.49} Rh _{0.01} Pd _{12.13} Pt _{1.67}) _{Σ16.70} (S _{6.21} Te _{0.09}) _{Σ6.30}

Примечание: 1, 3 — зерна железистой платины, содержащие василит; 2, 4 — включения василита; 5 — состав василита по данным webmineral; 6 — состав василита по данным [Tolstykh et al., 2000].

Таблица 7. Состав включений родарсенита (Rh,Pd)₂As в железистой платине, мас. %

Номер п/п	S	Fe	Ni	Cu	As	Ru	Rh	Pd	Pt	Сумма	Формула
1	—	11.14	0.34	0.51	—	1.90	6.03	—	80.01	99.93	(Fe _{1.14} Ni _{0.03} Cu _{0.05}) _{Σ1.21} (Ru _{0.11} Rh _{0.33} Pt _{2.34}) _{Σ2.78}
2	—	0.59	1.00	—	23.79	—	60.34	10.02	2.25	97.99	(Fe _{0.03} Ni _{0.05} Rh _{1.70} Pd _{0.27} Pt _{0.03}) _{Σ2.08} As _{0.92}
3	—	0.27	1.10	—	24.55	—	61.57	10.16	2.27	99.92	(Fe _{0.01} Ni _{0.05} Rh _{1.70} Pd _{0.27} Pt _{0.03}) _{Σ2.07} As _{0.93}
4	—	0.22	0.58	0.12	24.09	—	60.24	11.65	2.79	99.69	(Fe _{0.01} Ni _{0.03} Cu _{0.01} Rh _{1.68} Pd _{0.31} Pt _{0.04}) _{Σ2.08} As _{0.92}
5	—	0.35	1.09	—	24.67	—	60.95	10.10	1.45	98.61	(Fe _{0.02} Ni _{0.05} Rh _{1.69} Pd _{0.27} Pt _{0.02}) _{Σ2.06} As _{0.94}
6	—	9.88	0.36	0.37	0	2.33	8.30	0.96	79.31	101.51	(Fe _{1.00} Ni _{0.04} Cu _{0.03}) _{Σ1.07} (Ru _{0.13} Rh _{0.46} Pd _{0.05} Pt _{2.30}) _{Σ2.93}
7	2.04	0.42	1.10	—	23.95	—	58.19	11.37	3.37	98.44	(Fe _{0.02} Ni _{0.05} Rh _{1.54} Pd _{0.29} Pt _{0.05}) _{Σ1.95} (S _{0.17} As _{0.87}) _{Σ1.05}
8	—	—	—	—	26.25	—	54.64	18.84	—	100	(Rh _{1.51} Pd _{0.50}) _{Σ2.01} As _{0.99}
9	—	—	—	—	26.04	—	60.81	12.65	0.49	100.07	(Rh _{1.67} Pd _{0.34} Pt _{0.01}) _{Σ2.02} As _{0.98}

Примечание. 1, 6 — зерна железистой платины, содержащие родарсенит; 2—5, 7 — включения родарсенита; 8 — состав родарсенита по данным сайта webmineral.com; 9 — состав родарсенита по данным [Tarkian et al., 1997; Cabri, 2002].

Pt, Fe и Ni, однако состав его близок к теоретическому [The geology..., 2002], отличаясь повышенным содержанием родия (табл. 7).

Незначительный вклад в минеральное разнообразие приносят сульфосарсениты. **Платарсит PtAsS** образует небольшие (2—7 мкм) овальные или округлые включения, приуроченные к краевым частям зерен (см. рис. 9, з). Подобная картина отмечается только для низкородистой железистой платины. В состав платарсита изоморфно входят Rh (до 5.31 мас. %) и Ru (до 3.18 мас. %).

Теллуриды являются наиболее низкотемпературными включениями в шлиховой платине и представлены двумя минералами, обнаруженными в зернах платины, относимой ко второй низкородистой группе. **Теллурупалладинит Pd₂Te₄** образует два мономинеральных включения (10—12 мкм, 2 мкм) (см. рис. 9, д). В химическом составе наряду с Pd присутствует Rh (до 8 мас. %), что коррелируется с составом матрицы, представленной железистой платиной с примесью Rh (3.6 мас. %). Также установлена минеральная фаза, близкая по составу к **монченту (Pt,Pd)(Te,Bi)₂**. Однако особенностью данного минерала является наличие в составе кроме Pt и Pd также Rh.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследования показали, что ЭПГ минерализация в шлихах россыпи с участка Маят-Водораздельный представлена Fe-Pt твердыми растворами (около 93 %) и Os-Ir-Ru сплавами в виде рутенистого осмия и рутения. Содержание железа в платине варьируется в пределах 20—35 ат. %, что близко к стехиометрии соединения Pt₃Fe с небольшим смещением в сторону Fe компонента (совместно с примесями Ni и Cu). Содержание изоморфных примесей Rh, Ru, Pd и Ir в платине в среднем составляет 7.6 ат. % и достигает 20 ат. %. Железисто-платиновые твердые растворы в основном относятся к железистой платине родиевой специализации. Встречаются зерна палладисто-железистой и иридино-железистой платины, что может указывать на различные источники происхождения вещества и (или) разные стадии развития рудообразующих систем [Tolstykh et al., 2002b]. Известно, что палладий связан с породами

Таблица 8. Состав алюмосиликатных включений в иридисто-железистой платине, мас. %

Номер точки	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Сумма
1	44.06	2.16	2.21	6.53	23.94	0.9	4.71	1.58	—	—	7.09	94.66
2	27.12	1.62	1.01	5.15	20.49	0.96	3.4	1.7	2.17	—	2.99	66.61
3	45.35	2.52	2.96	6.81	22.12	0.71	4.97	1.81	0.25	0.25	8.24	95.99

Примечание. Местонахождение точек анализа показано на рис. 9, e.

основного состава, которые формируют такие крупнейшие интрузии, как Седбери, Норильск, являющиеся основными источниками палладия на мировом рынке. С другой стороны, иридий характерен для ультраосновных пород, в которых концентрируются тугоплавкие элементы платиновой группы (Ir, Os, Ru). Иридисто-платиновая минерализация характерна для платиноносных месторождений уральского типа Корякско-Камчатской провинции, связанных с концентрически-зональными дунит-клинопироксенит-габбровыми массивами [Додин и др., 2000]. В подтверждение этого может послужить наличие алюмосиликатных расплавных включений, обнаруженных нами в иридисто-железистой платине $Pt_{81.8}Ir_{5.4}Rh_{1.7}Os_{1.1}Ru_{0.8}Fe_{9.2}$ (см. рис. 9, e). По своему химизму они приближаются к роговой обманке (см. табл. 8, т. 3) следующего состава:



Как известно, роговая обманка и плагиоклаз основного состава характерны для щелочных базитовых пород. Эти данные согласуются с данными А.В. Округина с соавторами [2012], обнаружившими в аналогичной по составу иридистой платине $Pt_{78}Ir_8Os_{0.6}Rh_{3.5}Fe_{9.3}Ni_{0.6}$ включение раскристаллизованного силикатного вещества, захваченного платиной реликта вмещающей мантии, по химическому составу соответствующего породам ийолит-мельтейгитового ряда.

Основная часть минералов МПГ в шлихах представлена железистой платиной уникальной родиевой специализации, характерной только для россыпепроявлений на востоке Сибирской платформы, выделенной в «вилюйский тип» [Округин, 2000]. Практически полное отсутствие тугоплавких примесей (Ir, Os) в составе железистой платины вызвано выделением имевшегося их количества на ранних высокотемпературных стадиях развития системы либо в виде рутениридосмина, либо в виде двухфазных агрегатов железо-платиновых растворов с включениями ламеллей Ru-Ir-Os сплава переменного состава [Округин, 2002]. Присутствие в железистой платине вилюйского типа повышенных концентраций Rh (до 12 мас. %) и Ru (до 5 мас. %), обладающих высоким сродством к сере, указывает на низкую летучесть серы при формировании этих сплавов. Непрерывность изменения проявленного рутений-родиевого тренда указывает на эволюцию платинометалльного рудообразования. Постепенное повышение фугитивности серы приводит к тому, что на заключительных этапах формирования системы халькофильные платиноиды Rh, Ru, а позже и Pd постепенно связываются в сульфидные и арсенидные фазы. Система идет по пути кристаллизации сульфидно-металлических расплавов. В дальнейшем первичные минералы подвергаются постмагматической проработке (в процессе серпентинизации). Высокородистая разновидность Fe-Pt сплавов (до 11.3 мас. %) наиболее насыщена сульфидами, прежде всего сульфидами Rh и Ru. Значительные концентрации родия (до 11.3 мас. %) в рудообразующей системе обусловили формирование многочисленных соединений родия с серой: миассит, кингстонит, боуит. При этом сформировывалась специфическая ассоциация минералов-включений, возможная только для подобного типа Fe-Pt сплавов.

Платина похожего состава в других месторождениях встречается крайне редко. Единичные ее проявления обнаружены в россыпепроявлениях, связанных с выходами мафит-ультрамафитовых комплексов о. Тасмания [Ford, 1981], альпинотипных ультрамафитов Корякского нагорья [Мочалов и др., 1990], а также конгломератах Витватерсранда [Feather, 1976]. Проведенное исследование особенностей МПГ и минералов-включений согласуется с наблюдениями предыдущих исследователей [Округин, 2002, 2009, 2010; Додин, 2002] и открывает новые особенности, которые более полно раскрывают природу такого уникального природного объекта.

Работа выполнена при поддержке программ ОНЗ-5.1, СО РАН ИП 89, гранта РФФИ 12-05-01164 и Минобрнауки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

Бритвин С.Н., Рудашевский Н.С., Богданова А.Н. Миассит — $Rh_{17}S_{15}$ — новый минерал из россыпи реки Миасс (Урал) // Зап. ВМО, 2001, № 2, с. 41—45.

- Высоцкий Н.К.** Платина и районы ее добычи. Часть II, III. Петроград, КЕПС, 1923, 371 с.
- Додин Д.А.** Металлогения Таймыро-Норильского региона (север Центральной Сибири). СПб., Наука, 2002, 822 с.
- Додин Д.А., Чернышов Н.М., Яцкевич Б.А.** Платинометалльные месторождения России. СПб., Наука, 2000, 755 с.
- Кудряшова В.И., Смольянинова В.Н.** Новые минералы. LX. Интерметаллические соединения, сульфиды, селениды, сульфосоли // Зап. ВМО, 2006, № 6, с. 23—37.
- Мочалов А.Г., Дмитренко Г.Г.** Минералогия платиноидов альпинотипных ультрамафитов // Петрология гипербазитов и базитов. Новосибирск, Наука, 1990, с. 144—167.
- Округин А.В.** Россыпная платиноносность Сибирской платформы. Якутск, ЯФ Из-во СО РАН, 2000, 183 с.
- Округин А.В.** Типоморфные ассоциации минералов платиновой группы в россыпях Сибирской платформы: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Новосибирск, 2002, 38 с.
- Округин А.В., Мазур А.Б., Земнухов А.Л., Попков П.А., Слепцов С.В.** Ассоциация палладистого золота с минералами платиновой группы в россыпях бассейна р. Анабар на северо-востоке Сибирской платформы // Отечественная геология, 2009, № 5, с. 3—11.
- Округин А.В., Охлопков С.С., Граханов С.А., Земнухов А.Л., Иванов П.О., Попков П.А., Слепцов С.В.** Комплексные платино-золото-алмазонаосные россыпи с самоцветными минералами на северо-востоке Сибирской платформы // Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения (материалы XIV Международного совещания). Новосибирск, 2010, с. 521—525.
- Округин А.В., Зайцев А.И., Борисенко А.С., Земнухов А.Л., Иванов П.О.** Золотоплатиноносные россыпи бассейна р. Анабар и их возможная связь с щелочно-ультраосновными магматитами севера Сибирской платформы // Отечественная геология, 2012, № 5, с. 11—20.
- Подлипский М.Ю., Нестеренко Г.В., Кривенко А.П.** Изоферроплатиновая ассоциация минералов золотоносной россыпи Северо-Западного Салаира // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 372—381.
- Толстых Н.Д., Кривенко А.П.** О составе сульфидов, содержащих элементы платиновой группы // Зап. ВМО, 1994, № 22, с. 41—49.
- Толстых Н.Д., Кривенко А.П.** Минералы платиновых металлов в россыпи р. Инагли (Алданский щит) // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (4), с. 765—774.
- Шило Н.А.** Учение о россыпях: теория россыпеобразующих рудных формаций и россыпей. Владивосток, Дальнаука, 2002, 576 с.
- Cabri L.J., Criddle A.J., Laftamme J.H.C., Beare C.S., Harris D.S.** Mineralogical study of complex Pt-Fe nuggets from Ethiopia // Bull. Miner., 1981, v. 104, p. 508—525.
- Cabri L.J., Harris D.C., Weiser W.** Mineralogy and distribution of platinum-group mineral (PGM) placer deposits of the world // Explor. Mining Geol., 1996, v. 5, № 2, p. 73—167.
- Feather C.E.** Mineralogy of platinum-group minerals in the Witwatersrand, South Africa // Econ. Geol., 1976, v. 71, № 7, p. 1399—1428.
- Ford R.T.** Platinum-group minerals in Tasmania // Econ. Geol., 1981, v. 76, № 2, p. 498—504.
- Johan Z., Slansky E., Kelly D.A.** Platinum nuggets from the Kompiam area, Enga Province, Papua New Guinea: evidence for an Alaskan-type complex // Miner. Petrol., 2000, v. 68, p. 159—176.
- Hagen D., Weiser Th., Than Htay.** Platinum-group minerals in Quaternary gold placers in the upper Chindwin area of Northern Burma // Miner. Petrol., 1990, № 42, p. 265—286.
- Harris D.C., Cabri L.J.** Nomenclature of platinum group-element alloys: review and revision // Canad. Miner., 1991, v. 29, p. 231—237.
- Slansky E., Johan Z., Ohnenstetter M., Barron L.M., Suppel D.** Platinum mineralization in the Alaskan-type intrusive complexes near Fifield, NSW, Australia. 2. Platinum-group minerals in placer deposits at Fifield // Miner. Petrol., 1991, № 43, p. 161—180.
- The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri.** Ontario, CIM Spec., 2002, v. 54, 852 p.
- Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., Krivenko A.P., Podlipkiy M.** The association of platinum-group minerals in placers of the Pustaya river, Kamchatka, Russia // Canad. Miner., 2000, v. 38, p. 1251—1264.
- Tolstykh N.D., Foley J., Sidorov E.G., Laajoki K.** Composition of the platinum-group minerals in the Salmon River placer deposits, Goodnews Bay, Alaska // Canad. Miner., 2002a, v. 40, № 2, p. 463—472.

Tolstykh N., Krivenko A., Sidorov E., Kauko L., Podlipsky M. Ore mineralogy of PGM placers in Siberia and the Russian Far East // Ore Geol. Rev., 2002b, v. 20, p. 1—25.

Weiser Th., Schmidt-Thome M. Platinum-group minerals from the Santiago River, Esmeraldas Province, Ecuador // Canad. Miner., 1993, v. 31, p. 61—73.

*Рекомендована к печати 26 ноября 2013 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию 21 января 2013 г.,
после доработки — 4 сентября 2013 г.*