

ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ РУЧЬЯ ПРИЖИМНЫЙ (Корякское нагорье)

А.В. Кутырев, Е.Г. Сидоров, А.В. Антонов*, В.М. Чубаров

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, Россия

* Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

В аллювиальных отложениях ручья Прижимный (южная часть Корякского нагорья) наряду с золотом встречаются зерна минералов элементов платиновой группы (ЭПГ). Установлено, что они представляют собой самородную платину (Pt, Fe), содержащую медь (до 5 мас. %), осмий (до 8 мас. %) и родий (до 2 мас. %). Включения в платине представлены самородным осмием (примесь иридия достигает 12 мас. %, средние значения – 0.2—4 мас. %), неназванным интерметаллидом состава PtRh, сульфидами и арсенидами ЭПГ (куперит, лаурит, маланит, купроирридсит, купрородсит, сперрилит, холлингвортит, неназванные соединения PdS, (Ir,Ru)S₂, (Ir,Pt)S₂), меди и железа (борнит, халькопирит) хромитом и хроммагнетитом. Описано замещение кристаллов самородного осмия соединением состава IrO₂. Установлено, что оно образовано в ходе окислительного процесса, сопровождающегося замещением изоферроплатины самородной платиной. Полученные данные соответствуют результатам изучения ассоциаций МПП из россыпей, связанных со слабоэродированными массивами урало-алаянского типа, апикальные части которых сформированы в условиях повышенной активности кислорода. В качестве потенциального коренного источника МПП рассматриваются клинопироксениты Прижимного массива.

Минералы платиновой группы, россыпь, Pt–Fe сплавы, массивы урало-алаянского типа, Корякско-Камчатский платиноносный пояс.

PLATINUM-GROUP MINERAL ASSEMBLAGE OF THE PRIZHIMNY CREEK (Koryak Highland)

A.V. Kutyrev, E.G. Sidorov, A.V. Antonov, and V.M. Chubarov

In the alluvial deposits of the Prizhlimny Creek (southern part of the Koryak Highland), grains of platinum-group minerals are found along with gold. We have established that the grains are native platinum (Pt, Fe) containing Cu (up to 5 wt.%), Os (up to 8 wt.%), and Rh (up to 2 wt.%). Inclusions in the platinum are native osmium (the content of Ir impurity reaches 12 wt.%, the average content being 0.2–4 wt.%), an unnamed intermetallic compound of composition PtRh, sulfides and arsenides of PGE (cooperite, laurite, malanite, cuproirridsite, cuprorhodsite, sperrylite, hollingworthite, unnamed compounds PdS, (Ir,Ru)S₂, (Ir,Pt)S₂), Cu, and Fe (bornite, chalcopyrite), chromite, and Cr-magnetite. Replacement of native-osmium crystals by compound IrO₂ is described. It has been established that this compound formed during oxidation accompanied by the replacement of isoferroplatinum by native platinum. The data obtained agree with the results of study of platinum-group mineral assemblages from placers localized in weakly eroded Ural–Alaskan-type massifs whose apical parts formed under high oxygen activity conditions. Clinopyroxenites of the Prizhlimny massif are considered to be the potential source of PGE.

Platinum-group minerals, placer deposits, Pt–Fe alloys, Ural–Alaskan-type massifs, Koryak–Kamchatka belt

ВВЕДЕНИЕ

Первые сведения о базит-гипербазитовых массивах Корякско-Камчатского региона относятся к последнему десятилетию XIX столетия. Однако началом изучения собственно Корякско-Камчатского платиноносного пояса следует считать ряд тематических работ [Кутырев и др., 1991], в результате которых были выявлены россыпные проявления платины и охарактеризованы ассоциации МПП в россыпях, приуроченных к массивам клинопироксенит-дунитовой формации. В их числе были и россыпи, приуроченные к массивам Сейнав и Гальмознан, уникальные запасы которых (более 60 т МПП) вызвали большой интерес к проблеме платиноносности региона. За последующие десятилетия была проделана большая работа по изучению платиноносных концентрически-зональных массивов урало-алаянского типа Корякско-Камчатского региона, объединенных в протяженный платиноносный пояс [Кутырев и др., 1991; Подлипский и др., 1999; Мочалов, 2001; Корякско-Камчатский..., 2002; Tolstykh et al., 2000, 2002, 2005; Сидоров и др., 2004, 2012].

© А.В. Кутырев✉, Е.Г. Сидоров, А.В. Антонов, В.М. Чубаров, 2018

✉ e-mail: kutyrev.geologist@gmail.com

DOI: 10.15372/GiG20180803

Базит-гипербазитовые массивы Таманваямского ареала, к которым приурочена россыпь руч. Прижимный, составляют северо-восточный сегмент пояса и находятся в числе наименее изученных объектов в отношении их платиноносности. Тела дунитов, являющихся главным источником россыпной платины, установлены здесь лишь в малом объеме и на значительном удалении от россыпи. Единственными магматическими образованиями ультраосновного состава, описанными в литературе в области питания россыпи, являются небольшие тела оливиновых клинопироксенитов и штоки пикритов [Карта..., 1999]. Тем не менее, в золотой россыпи ручья Прижимный, дренирующего небольшое тело габбро и оливиновых клинопироксенитов одноименного массива, было добыто 850 кг золота и около 50 кг металлов платиновой группы. Данная работа является результатом детального изучения минералов ЭПГ из россыпи с целью определения их потенциального коренного источника и сопоставления результатов с известными эталонными объектами.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ РОССЫПИ РУЧЬЯ ПРИЖИМНЫЙ

Массивы корякской части Корякско-Камчатского платиноносного пояса расположены в пределах Камчатско-Олюторской складчатой зоны, сложенной вулканогенно-осадочными образованиями ватынской серии и ачайваямской свиты верхнего мела (сантон–маастрихт). В составе ватынской серии преобладают кремнистые породы — радиоляриты и яшмоиды, несколько меньшим распространением пользуются вулканыты — базальты (часто представленные пиллоу-лавами), андезиты, пикробазальты и их туфы. В составе ачайваямской свиты большее значение имеют породы вулканического происхождения, в первую очередь — лавы и пирокластические породы основного, среднего и, в меньшей степени, кислого состава, в то время как кремнистые породы развиты в меньшем объеме [Корякско-Камчатский..., 2002]. Платиноносные концентрически-зональные массивы залегают среди образований этих двух свит, при этом, контакты между ними носят тектонический характер: в краевых частях массивов отсутствуют признаки закалки, развиты зоны серпентинитового меланжа.

Район, в котором расположены массивы таманваямской группы, сложен образованиями ачайваямской свиты. Встречаются достаточно крупные, в первые сотни квадратных метров, штоки пикритов, в том числе в области питания рассматриваемой россыпи (рис. 1). Эти образования прорываются интрузиями вывесочного комплекса верхнего мела, одной из которых является Прижимный массив. Он представляет собой тело северо-западного простирания величиной 3×5 км, сложенное клинопироксенитами (в том числе их оливиновыми разностями) и габброидами. Между габбро и пироксенитами можно видеть переходные разности, представленные оливиновым габбро с линзами клинопироксена. Эти породы прорываются штоками пикрит-пикробазальтового состава и более поздними диоритами [Кеpezжинскas и др., 1991; Кеpezжинскas et al., 1993; Корякско-Камчатский..., 2002]. Дуниты на рассматриваемой территории были встречены только в пределах соседнего Мачевнинского массива.

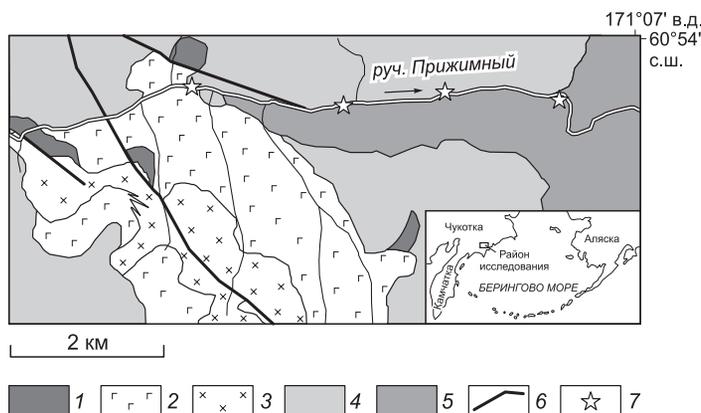
Ручей Прижимный является притоком р. Таманваям, берущей начало в оз. Анана и впадающей в Берингово море. Долина ручья имеет субширотное простирание, длина ее составляет 6 км. Русло ручья смещено к северному (левому) борту, характеризующемуся крутыми ровными эрозионно-денудационными склонами. В правом борту развиты аккумулятивные террасы различной высоты. У своего истока ручей дренирует породы Прижимного массива. Среднее содержание полезных компонентов в россыпи: золота — 0.760 г/м³, платины — 0.006 г/м³.

АНАЛИТИКА

Определение состава зерен платиновых минералов производилось после стандартного разделения шлихового материала (методами магнитной и гравитационной сортировки) и просмотра отобранных зерен из разных фракций под оптическим рудным микроскопом на предмет обнаружения их внешних различий, с целью более полного охвата вариаций изучаемого материала. После сортировки по размерам, зерна зафиксированы на ровной поверхности двухсторонним скот-

Рис. 1. Схема расположения россыпи ручья Прижимный.

1 — штоки пикритов; 2, 3 — породы Прижимного массива: 2 — пироксениты и габбро, 3 — диориты и гранодиориты; 4 — вулканогенно-осадочные породы ачайваямской свиты; 5 — четвертичные образования; 6 — разрывные нарушения; 7 — места отбора шлиховых проб. Составлено с использованием материалов Я.А. Семенова.



чем и сформованы в шашку эпоксидным компаундом. После отвердевания смолы, зерна платиноидов шлифованы до уровня наибольшего вскрытия внутренних фаз и отполированы с применением серии алмазных паст (в диапазоне крупности: 10—7 до 0—1 мкм). Подготовленный таким образом материал был изучен с применением сканирующего электронного микроскопа VEGA 3, оснащенного энерго-дисперсионным спектрометром (ЭДС X-MAX с площадью 80 мм²) с фирменным ПО (программным обеспечением) Aztec, аналитик В.М. Чубаров, ИВиС ДВО РАН, и на электронном микроскопе CamScan MX2500, оборудованном энергодисперсионным спектрометром Link Pentafet (Oxford Instruments, Si (Li) детектор с площадью 10 мм²), укомплектованным фирменным ПО INCA, аналитик А.В. Антонов, ФГБУ «ВСЕГЕИ»; некоторые анализы были продублированы с использованием микрозонда Camebax-244, укомплектованного четырьмя волновыми спектрометрами (с фирменным ПО ZAF-коррекции фирмы СAMEСА, модернизированного и перенесенного на ПЭВМ авторами) и энергодисперсионным спектрометром X-MAX 50 с фирменным ПО INCA. Для обеспечения необходимой электропроводности непроводящих участков поверхности смолы-компаунда и минералов с недостаточной проводимостью, на поверхность образцов наносился тонкий слой углерода, полученного путем испарения в вакууме графита.

В качестве эталонов на элементы платиновой группы использованы чистые металлы: Pt, Os, Ir, Ru, Rh, Pd. Для определения As и S применялись, соответственно, искусственные соединения FeAsS и FeS₂. Аналогично — Te, Sb, Bi, Pb, Cu, — определялись по искусственным соединениям: CdTe, CuSbS₂, Bi₂S₃, PbS, HgS, CuFeS₂. Металлические эталоны: Au, Ag, Ni, Fe — использованы одноименные элементы. Для определения Co применялся сплав Fe-Co-Ni известного состава.

В качестве аналитических линий для элементов Pt, Os, Ir использованы M_{α} -линии; Ru, Rh, Pd и As — L_{α} -линии; Fe, Cu, S, Ni, Al, Mg, Ca, V, Mn, Ti, Cr, O — K_{α} линии рентгеновского спектра. Анализы проводились с использованием ускоряющего напряжения 20 кВ и тока образца на контрольном эталоне Ni: для СЭМ Vega 3 — 0.7 нА; микрозонда CamScan MX2500 — 0.5 нА; микрозонда Camebax № 244 — 20 нА.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морфологические особенности зерен платины. Размер зерен платины составляет от 0.1 до 3.0 мм с преобладанием мелкой фракции. Они обладают изометричной либо несколько удлиненной формой. Большая их часть характеризуется высокой степенью окатанности (рис. 2, а), часто отмечаются (см. рис. 2, а, б) сростания с хромшпинелидами (см. рис. 2, а, в). Зерна с сохранившимися идиоморфными гранями не обнаружены.

Состав минералов платиновых металлов. Все без исключения зерна металлов платиновой группы, встреченные в россыпи ручья Прижимный, представляют собой матрицу из Pt-Fe сплавов (рис. 3), в которой находятся включения самородного осмия, различных сульфидов и арсенидов ЭПГ, хромшпинелиды, оксиды и силикаты. Других минералов ЭПГ (кроме как во включениях) в шлиховом ореоле не выявлено, тогда как в некоторых россыпях, связанных с массивами урало-аляскинского типа, встречаются зерна Os-Ir-Ru сплавов и сперрилит [Tolstykh et al., 2005; Малич и др., 2015].

Самородные металлы и сплавы. Минералы состава Pt-Fe представлены самородной платиной и изоферроплатиной, составы которых могут быть выражены следующими формулами: Pt₃Fe для изоферроплатины, хотя при этом возможны значительные отклонения состава изоферроплатины от идеального, и Pt, Fe для самородной платины с содержанием Pt и других ЭПГ более 80 ат. % [Cabri, Feather, 1975; Malitch, Thalhammer, 2002]. При этом, так как для магматических Pt-Fe сплавов наблюдается отрицательная корреляция Pt и Cu, что видно на рис. 4, а, при расчете формулы Cu необходимо прибавлять к ЭПГ. Таким образом, все изученные зерна, за исключением полиминерального включения, описание

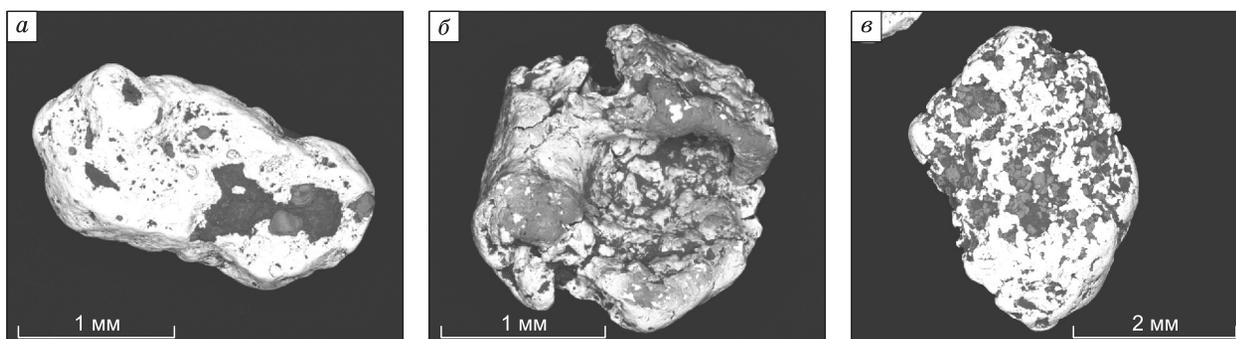


Рис. 2. Изображения зерен платины из россыпи ручья Прижимный в отраженных электронах.

а—в — пояснения см. в тексте.

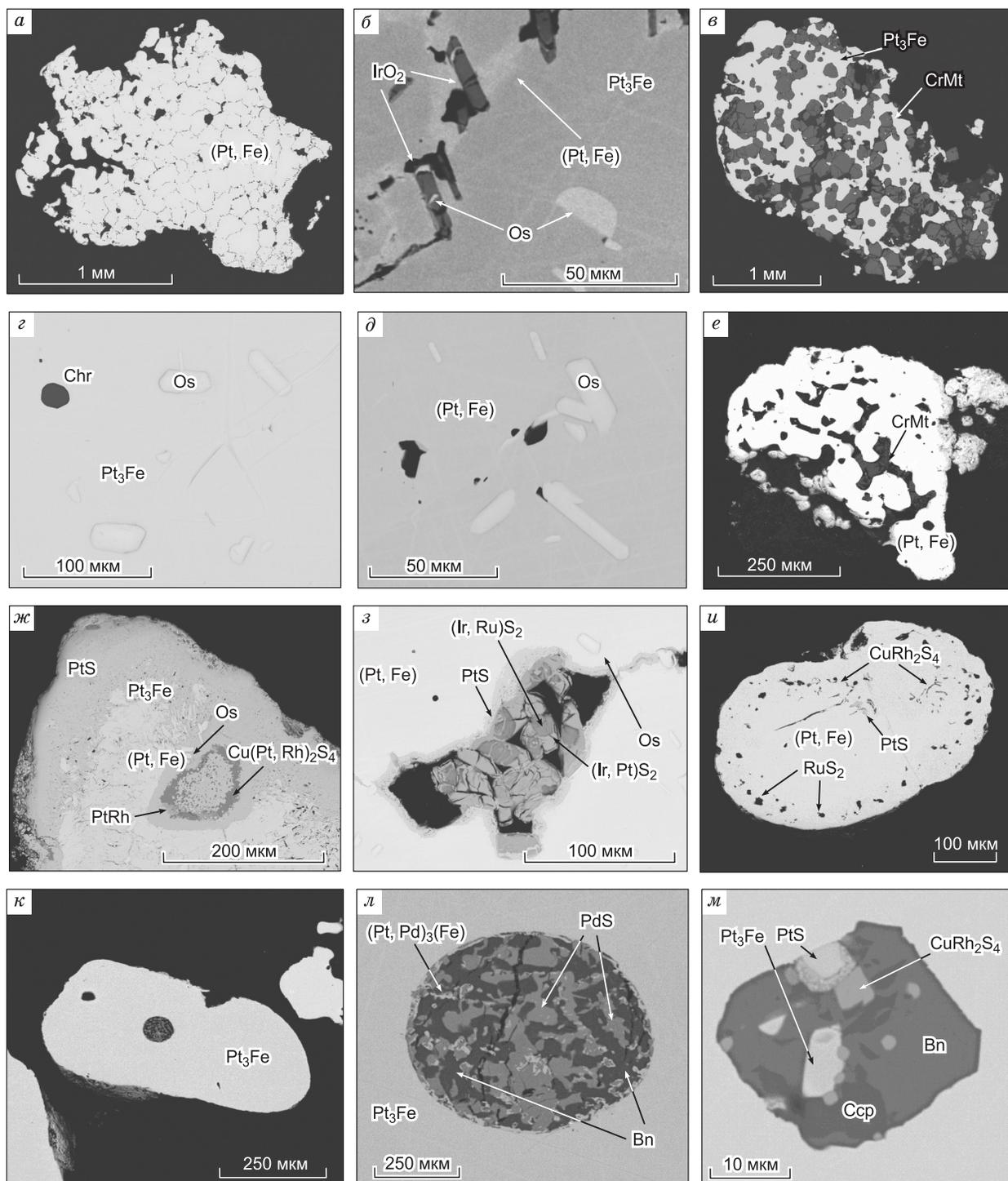


Рис. 3. Изображения зерен платины в отраженных электронах.

a — поликристаллический агрегат зерен изоферроплатины; *б* — увеличенный фрагмент изображения *a*, видны включения оксида иридия и самородного осмия, на контакте между зерен можно наблюдать каемку самородной платины; *в* — срастание хроммагнетита и платины; *г* — включения хромита и самородного осмия в изоферроплатине; *д* — включения самородного осмия в самородной платине; *е* — срастание хроммагнетита и самородной платины; *ж* — зерно самородной платины, замещаемое куперитом PtS и маланитом CuPt_2S_4 , присутствует незаванный интерметаллид PtRh; *з* — каверна в зерне самородной платины, содержащая кристаллы незаванных соединений $(\text{Ir, Ru})\text{S}_2$ и $(\text{Ir, Pt})\text{S}_2$; *и* — зерно самородной платины, содержащее зонально распределенные включения лаурита RuS_2 и мirmekитоподобные включения купрородсита CuRh_2S_4 ; *к*, *л* — полиминеральное сульфидное включение в изоферроплатине, содержащее борнит Cu_3FeS_4 , высокоцит и палладиостую изоферроплатину; *м* — полиминеральное сульфидное включение, состоящее из борнита, халькопирита, куперита и купрородсита.

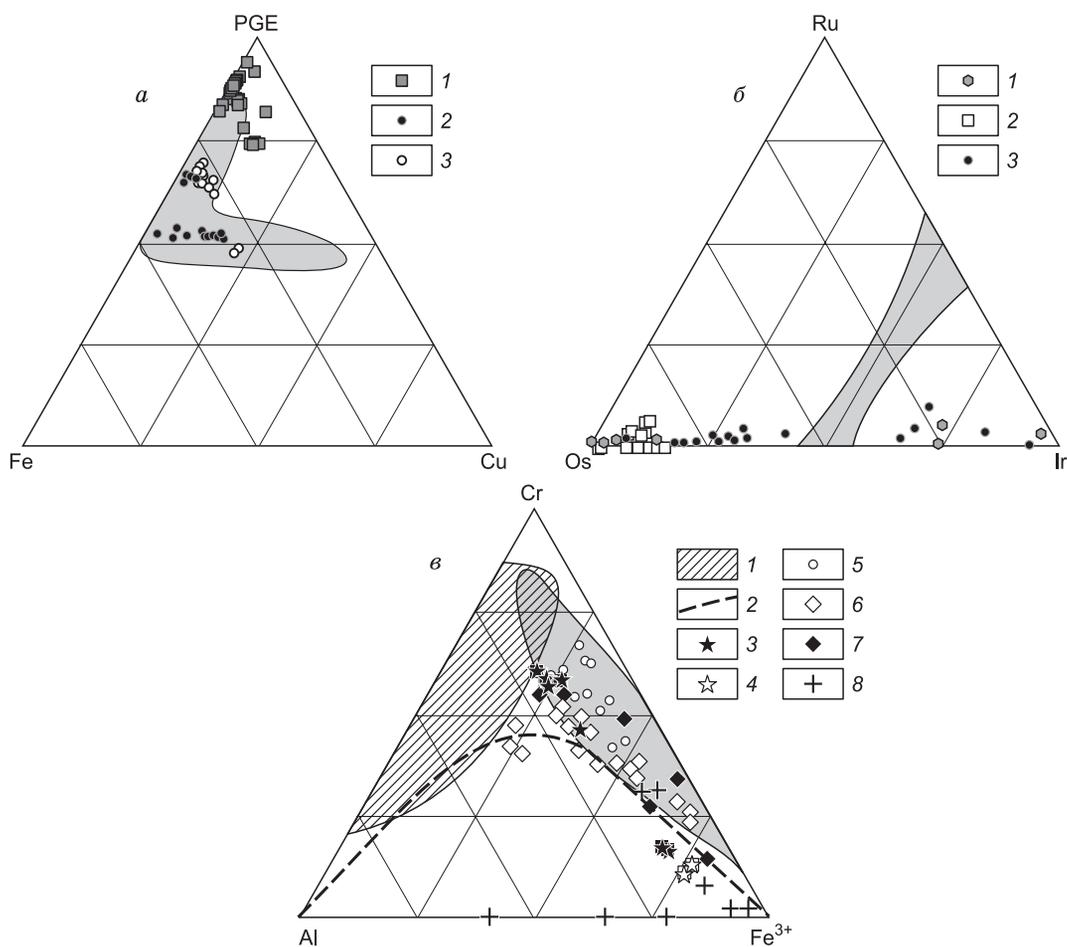


Рис. 4. Тройные диаграммы составов минералов россыпи ручья Прижимный.

a — состав Pt-Fe сплавов, 1 — россыпь ручья Прижимный, 2, 3 — Нижнетагильский (2) и Кондерский (3) массивы [Малич, Баданова, 2015], серым обозначена область составов аналогичных минералов Гальмознанского массива [Сидоров и др., 2012]; *б* — составы Os-Ir-Ru сплавов, серым обозначена область несмесимости между гексагональными (Os,Ru) и кубическими (Ir) твердыми растворами, 1 — Вересовоборский массив, Урал [Толстых и др., 2011], 2 — ручей Прижимный, 3 — Гальмознанский массив [Корякско-Камчатский..., 2002]; *в* — составы хромшпинелидов: 1—3 — поле состава хромшпинелидов альпинотипных (1) и расслоенных (2) массивов, 3 — хромшпинелиды из включений в платине, 4 — хромшпинелиды оливиновых клинопироксенитов массивов Таманваемского ареала, 5 — хромшпинелиды массива Гальмознан [Сидоров и др., 2012]; 6 — хромшпинелиды массива Эпильчик [Kеpezhinskas et al., 1993]; 7—8 — хромшпинелиды дунитов (7) и клинопироксенитов (8) Нижнетагильского массива [Krause et al., 2007].

которого приводится ниже, относится к самородной платине. Это не является типичным для дунитов и связанных с ними хромититов зональных массивов, в которых обычно преобладает изоферроплатина Pt_3Fe , а самородная платина встречается относительно редко [Корякско-Камчатский..., 2002; Сидоров, 2009] и преимущественно в россыпях, связанных с массивами, характеризующимися незначительной глубиной эрозионного среза [Некрасов и др., 1994], например, в россыпи р. Пустая [Tolstykh et al., 2000; Сидоров и др., 2004]. Другой принципиальной особенностью состава Pt-Fe сплавов россыпи ручья Прижимный является высокая концентрация меди, достигающая в некоторых зернах 5 мас. %. Находки самородной платины с таким составом очень редки — одним из немногих примеров являются россыпи Кузнецкого Алатау [Толстых и др., 1996].

Особый интерес представляет поликристаллический микроагрегат, сложенный зернами самородной платины состава $Pt_{0.70}Fe_{0.15}Cu_{0.10}Os_{0.04}Rh_{0.01}$, сцементированными более «чистой» самородной платиной состава $Pt_{0.82}Fe_{0.08}Cu_{0.10}$ в виде тонких (2—4 мкм) прослоек между отдельными зернами (рис. 3, *a, б*).

Особое место занимает палладистая изоферроплатина, содержащая 12.48 мас. % палладия и 5.36 мас. % меди, обнаруженная в полиминеральном включении в изоферроплатине в ассоциации с сульфидом палладия и борнитом (рис. 3, *л*; табл. 1, ан. 8).

Минералы состава Os-Ir-Ru (табл. 2) встречены только в виде включений в самородной платине или изоферроплатине (см. рис. 3, *б, г, д*). Все Os-Ir-Ru минералы представлены самородным осмием,

Таблица. 1. Состав Pt-Fe сплавов из россыпи ручья Прижимный, мас. %

№ п/п	Pt	Fe	Cu	Os	Ir	Rh	Pd	Сумма
1	89.06	4.98	4.51	—	—	1.43	—	99.98
2	88.75	4.61	5.03	—	—	1.58	—	99.97
3	88.32	5.27	4.08	—	—	1.02	—	98.69
4	94.54	4.10	—	—	—	—	—	98.63
5	94.94	3.92	—	—	—	—	—	98.86
6	95.20	3.61	—	—	—	—	—	98.81
7	95.63	4.25	—	—	—	—	—	99.88
8	93.94	3.99	0.85	—	—	—	—	98.78
9	95.23	3.95	0.94	—	—	—	—	100.12
10	94.30	3.91	1.27	—	—	—	—	99.48
11	94.69	4.10	1.24	—	—	—	—	100.03
12	93.11	2.84	—	—	—	1.15	—	97.10
13	94.65	3.13	—	—	—	—	—	97.78
14	93.77	2.78	—	2.91	—	—	—	99.46
15	93.75	3.26	—	3.51	—	—	—	100.52
16	93.46	3.15	—	4.35	—	—	—	100.96
17	92.40	3.12	—	3.72	—	—	—	99.24
18	91.75	3.06	—	3.45	—	—	—	98.26
19	91.49	3.11	—	4.45	—	—	—	99.05
20	91.95	3.71	—	3.22	—	1.40	—	100.28
21	91.84	3.43	—	4.00	—	1.28	—	100.55
22	90.26	3.51	—	3.82	—	1.62	—	99.22
23	92.68	3.92	—	4.20	—	—	—	100.80
24	93.35	4.06	—	3.34	—	—	—	100.75
25	93.06	3.70	—	3.21	—	—	—	99.96
26	93.14	3.76	—	3.07	—	—	—	99.97
27	92.93	3.54	—	3.36	—	—	—	99.83
28	85.79	5.11	4.41	4.14	—	—	—	99.44
29	88.24	4.97	2.83	3.87	—	—	—	99.91
30	86.24	4.75	—	3.67	2.29	1.26	2.48	100.69
31	85.51	3.84	—	4.15	3.33	1.79	1.46	100.08
32	85.80	5.31	4.15	3.38	—	0.95	—	99.58
33	93.29	2.54	3.67	—	—	—	—	99.50
34	72.94	9.28	5.36	—	—	—	12.48	100.06

Примечание. Анализы 1—33 — составы зерен самородной платины, 32 — состав платины поликристаллического агрегата, 33 — состав межзерновой платины поликристаллического агрегата, 34 — палладистая платина из полиминерального включения.

содержащим примесь иридия (от десятых долей до 12 мас. %). Составы образуют типичный для массивов урало-алаянского типа осмиевый тренд, отличаясь при этом отсутствием самородного иридия и осмия с высоким содержанием иридия (см. рис. 4, б), характерного для большинства россыпей, связанных с массивами урало-алаянского типа [Лазаренков и др., 1992; Tolstykh et al., 2005].

Другие интерметаллиды. В одном из зерен, характеризующихся интенсивным замещением самородной платины различными сульфидами ЭПГ (см. рис. 3, ж), обнаружен неназванный сплав состава $Pt_{0.51}Rh_{0.49}$ (см. табл. 1). Приуроченность этого соединения к описанному ниже маланиту $Cu_{1.04}(Pt_{1.07}Rh_{0.92})_{1.99}S_{3.97}$ и близость их составов позволяет предположить, что соединение PtRh образовалось вследствие его замещения. Замещение сульфидов ЭПГ — бауита и кашинита — интерметаллидами ЭПГ было описано для Каменушинского массива на Урале [Толстых и др., 2011].

В заключение можно сказать, что состав самородных металлов из россыпи ручья Прижимный в целом соответствует аналогичным минералам из других концентрически-зональных массивов, обладая при этом рядом специфических особенностей, таких как:

1) преобладание в рассматриваемой россыпной ассоциации самородной платины над изоферроплатиной;

Таблица 2. Состав Os-Ir-Ru сплавов из россыпи руды Прижимный (мас. %)

№ п/п	Os	Ir	Ru	Сумма
1	88.56	9.45	1.78	99.78
2	91.06	6.75	0.95	98.76
3	92.02	7.12	1.14	100.28
4	88.27	12.20	—	100.47
5	90.77	7.82	—	98.59
6	98.21	2.05	—	100.26
7	96.62	2.08	—	98.70
8	88.42	10.41	—	98.83
9	88.00	10.42	—	98.42
10	83.38	16.09	—	99.47
11	91.17	8.54	—	99.71
12	91.37	8.25	—	99.62
13	88.37	9.77	1.68	99.82
14	97.70	2.54	—	100.24
15	88.87	10.44	—	99.31

Лаурит RuS₂. Рассчитанная формула: (Ru_{0.64}Os_{0.30}Fe_{0.01})_{0.95}S_{2.05}. Лаурит встречается в виде изомеричных кристаллов на границах между индивидами и в кавернах в поликристаллическом зерне осмистой платины. Он содержит 23—36 мас. % рутения и 28—38 мас. % осмия (табл. 3), при этом повышенные содержания осмия характерны для краевых частей зерен (рис. 3, и). В некоторых зернах установлена примесь родия до 2 мас. % и иридия до 5 мас. %.

Борнит Cu₅FeS₄. Рассчитанная формула Cu_{5.29}Fe_{0.79}S_{3.92}. Встречен исключительно в полиминеральных сульфидных включениях в платине, где ассоциирует с сульфидами платины и палладия, палладистой изоферроплатиной, а также халькопиритом (см. рис. 3, к, л, м).

Халькопирит CuFeS₂. Рассчитанная формула: Cu_{1.03}Fe_{0.98}S_{1.98}. Встречен в составе сульфидного включения, описанного выше (см. рис. 3, м).

Высоцкит (Pd,Pt)S. Рассчитанная формула: (Pd_{0.89}Pt_{0.12})_{1.01}S_{0.96}. Встречен в составе полиминерального сульфидного агрегата в тесном сростании с борнитом и палладистой изоферроплатиной (см. рис. 3, к, л). Следует отметить отсутствие в составе высокоцита никеля.

Незаванное соединение 1 (Ir,Ru)S₂. Рассчитанная формула: (Ir_{0.43}Ru_{0.38}Pt_{0.07}Os_{0.04}Cu_{0.02})_{0.96}S_{2.03}As_{0.02}. Оно встречается в виде идиоморфных кристаллов столбчатого облика, находящихся в полости в самородной платине (Pt,Fe). Краевые зоны этих кристаллов имеют совершенно другой состав, отвечая названному соединению 2 [(Ir,Pt)S₂], что отчетливо видно на BSE-изображении (рис. 3, з). Обращает на себя внимание близость состава рассматриваемого соединения к описанному выше лауриту. Однако рассматривать их в качестве членов изоморфного ряда нельзя из-за того, что индивиды данного соединения, кристаллизовавшиеся в полости, обладают признаками кристаллов сингоний средней категории, в то время как лаурит является минералом кубической сингонии.

Незаванное соединение 2 (Ir,Pt)S₂. Рассчитанная формула: (Ir_{0.39}Pt_{0.26}Cu_{0.18}Ru_{0.16}Rh_{0.04}Os_{0.01})_{1.04}S_{1.87}As_{0.08}Te_{0.02}. Слагает краевые зоны кристаллов названного соединения 1.

Тиошпинели

Купроиридисит CuIr₂S₄. Рассчитанная формула: Cu_{1.00}(Ir_{1.13}Rh_{0.52}Pt_{0.48})_{2.13}S_{3.87}. Содержит значительные минеральные доли маланита и купрородсита. Встречен в виде равномерно распределенных по зерну изоферроплатины индивидов размером 5—10 мкм.

Маланит CuPt₂S₄. Рассчитанная формула: Cu_{1.04}(Pt_{1.07}Rh_{0.92})_{1.99}S_{3.97}. Является промежуточным членом изоморфного ряда маланит—купрородсит. В отличие от купроиридисита, данный минерал был встречен совместно с куперитом в составе каймы замещения платины (см. рис. 3, ж). Последовательность образования в данном случае следующая: маланит—куперит—маланит.

Купрородсит CuRh₂S₄. Рассчитанная формула: Cu_{0.89}(Rh_{1.00}Pt_{0.59}Ir_{0.49})_{2.08}S_{4.03}. Как и описанные выше минералы, содержит минеральные доли других тиошпинелей МПГ. Он находится в платине в виде мирмекитовых вростков (см. рис. 3, и). Кроме того, он встречается в составе полиминеральных сульфидных включений, где образует идиоморфные кристаллы в борнит-халькопиритовой матрице (см. рис. 3, м).

2) значительное содержание осмия в Pt-Fe сплавах при низком содержании иридия;

3) высокие содержания меди в Pt-Fe сплавах, достигающие иногда 5 мас. %;

4) отсутствие обычных для массивов урало-алаянского типа интерметаллидов, замещающих первичные Pt-Fe сплавы, — туламинита Pt₂FeCu, никельферроплатины Pt₂FeNi и тетраферроплатины PtFe [Лазаренков и др., 1992; Сидоров и др., 2012; Stepanov et al., 2017].

Сульфиды и арсениды ЭПГ и других металлов.

Сульфиды

Куперит PtS. Преобладает среди всех рассматриваемых в данном разделе минералов. Развивается за счет платины, образуя каймы в краевых частях ее зерен (см. рис. 3, ж) или же замещает ее вдоль трещинок и по краям пустот (см. рис. 3, ж, з). Замещение Pt-Fe сплавов куперитом было неоднократно описано ранее, в том числе в массиве Филиппа, где куперит образует контрастные внутренние каймы, а сперрилит — внешние [Подлипский и др., 1999]. Другой возможный вариант нахождения куперита — в составе полиминеральных сульфидных включений в платине (см. рис. 3, к, л, м).

Таблица 3. Состав сульфидов, арсенидов и других минералов ЭПГ (мас. %)

№ п/п	S	As	Ni	Fe	Cu	Ru	Pd	Rh	Os	Ir	Pt	Сумма	Минерал
1	11.30	—	—	—	—	—	—	—	2.65	—	85.56	99.51	Куперит
2	11.44	—	—	—	—	—	—	—	2.05	—	86.21	99.70	»
3	1.40	41.65	—	—	—	—	—	1.10	1.85	—	52.74	98.74	Сперрилит
4	9.39	36.76	—	0.76	—	—	—	28.21	—	—	24.45	99.56	Холлингвортит
5	35.53	—	—	—	—	36.15	—	—	28.24	—	—	99.93	Лаурит
6	29.93	—	—	—	—	25.52	—	2.95	35.91	5.69	—	100	»
7	29.47	—	—	—	—	23.18	—	2.85	38.55	6.25	—	100.30	»
8	22.19	—	—	0.96	11.30	—	—	9.55	—	38.90	16.94	99.83	Купроиридисит
9	21.96	—	—	0.81	10.86	—	—	8.58	—	39.86	16.33	98.39	»
10	25.54	—	—	—	11.13	—	—	20.29	—	18.53	22.90	98.39	Купродорсит
11	25.80	—	—	—	12.73	—	—	19.10	—	—	42.00	99.63	Маланит
12	25.26	—	—	—	13.82	—	—	19.16	—	—	42.12	100.36	»
13	24.56	—	—	10.08	62.00	—	—	—	—	—	—	96.64	Борнит
14	24.09	—	—	9.25	60.93	—	—	—	—	—	—	94.27	»
15	33.52	—	—	29.08	34.65	—	—	—	—	0.30	0.58	98.13	Халькопирит
16	20.68	—	—	—	1.10	—	63.83	—	—	—	15.30	100.91	Высоцкит
17	21.26	—	0.64	—	0.83	—	62.85	—	—	—	16.13	101.71	»
18	—	—	—	—	—	—	—	33.76	—	—	66.63	100.39	PtRh

Арсениды и сульфоарсениды

Сперрилит PtAs₂. Рассчитанная формула (Pt_{0.91}Rh_{0.04}Os_{0.03})_{0.97}As_{1.87}S_{0.15}. Сперрилит представлен неполной каймой, приуроченной к границе между платиной и замещающим ее куперитом PtS и холлингвортитом RhAsS.

Холлингвортит RhAsS. Рассчитанная формула (Rh_{0.70}Pt_{0.32})_{1.02}As_{1.24}S_{0.75}. Ассоциирует с описанным ранее сперрилитом. Состав отличается значительной примесью платины и избытком мышьяка, что позволяет рассматривать данное соединение как промежуточный член изоморфного ряда RhAsS—PtAs₂. Аналогичные минералы с промежуточным составом были описаны ранее для Светлоборского массива Уральского платиноносного пояса [Толстых и др., 2011].

Кислородсодержащие соединения ЭПГ. Несмотря на то, что кислородсодержащие соединения платиноидов достаточно часто упоминаются в литературе [Legendre, Augé, 1992; Tolstykh et al., 2000b; Мочалов, 2001; Толстых и др., 2011; Сидоров и др., 2012], в этой группе пока что есть только один изученный и подтвержденный минерал — палладинит PdO. В нескольких исследованных зернах были встречены псевдоморфозы по самородному осмию (см. рис. 3, б), состав которых отвечает формуле (Ir_{0.58}Ru_{0.16}Pt_{0.13}Rh_{0.06}Os_{0.01})_{0.94}O_{2.05} (табл. 4). Следует отметить, что для данного соединения не удалось получить анализ с суммой выше 95.5 мас. %, кроме того, наряду с ЭПГ в составе присутствует постоянная примесь Al, S, Ca, V и Mn. Это позволяет предположить, что рассматриваемое соединение может оказаться не оксидом, а гидроксидом. Ранее неназванное соединение аналогичной морфологии и схожего состава было обнаружено на Мадагаскаре в виде включений в изоферроплатине и самородной платине, содержащей значительную примесь осмия и меди, т. е. в схожей минеральной ассоциации [Legendre, Augé, 1992].

Состав хромшпинелидов, находящихся в сростании с платиной. Хромшпинелиды, встреченные в виде сростаний с МПГ и включений в них, можно отнести к двум группам: хроммагнетит (см. рис. 3, в, з) и хромит (см. рис. 2, а, 3, з). В пределах одного зерна МПГ встречается хромшпинелид только одного из этих двух типов. При этом, если хромит всегда образует идиоморфные включения в платине, то хроммагнетит может быть представлен как идиоморфными зернами (см. рис. 3, в), так и обла-

Таблица 4. Состав неназванного кислородсодержащего соединения ЭПГ (мас. %)

№ п/п	O	Al	S	Ca	V	Mn	Fe	Cu	Ru	Rh	Os	Ir	Pt	Сумма
1	14.46	0.91	1.03	1.40	0.69	0.44	0.59	0.85	7.67	2.91	2.80	51.67	10.09	95.51
2	14.92	0.56	1.99	2.15	0.90	0.62	0.75	0.85	7.41	3.03	—	49.34	12.61	95.13

Примечание. В ходе анализа производилось аналитическое определение кислорода.

дать более сложной формой (см. рис. 3, з). На диаграмме (см. рис. 4, в) можно видеть, что хромиты близки к полю хромшпинелидов Гальмознанского массива, отличаясь несколько более высокими концентрациями глинозема [Плаксенко, 1989; Kerezhinskas et al., 1993; Корякско-Камчатский..., 2002; Сидоров и др., 2012]. Хроммагнетиты по составу близки составу хромшпинелидов из клинопироксенитов массивов таманваямской группы (см. табл. 5).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно существующим экспериментальным данным [Kessel et al., 2001; Johan, 2002], содержание железа в Pt-Fe сплавах напрямую контролируется фугитивностью кислорода в минералообразующей среде. Для сред с высоким значением этого параметра характерна кристаллизация Pt-Fe сплавов, обедненных железом. Таким образом, наблюдаемое преобладание низкожелезистой самородной платины, характерное для россыпей, связанных со слабоэродированными массивами [Tolstykh et al., 2000a, 2002, 2005; Сидоров, 2009; Сидоров и др., 2012], может быть объяснено относительно большей фугитивностью кислорода на верхних уровнях минералообразующей системы. Наряду с этим, существуют свидетельства того, что источником самородной платины могут являться породы оболочки дунитового ядра — верлиты и клинопироксениты. Самородная платина была описана еще Н.К. Высоцким [1923] в россыпи Хищнического лога (Качканарский массив), в области питания которой залегают клинопироксениты. Кроме того, самородная платина известна в россыпи р. Пустая [Tolstykh et al., 2000a], источником для которой являются габбро и клинопироксениты Алхавитоваямского массива. Вероятно, для этих пород также характерна более высокая фугитивность кислорода по сравнению с дунитами глубоких горизонтов, учитывая строение массивов урало-алюскинского типа. Редкий случай совместного нахождения двух разновидностей платины, отличающихся по составу, можно видеть на рис. 3, а, б, где изображен поликристаллический микроагрегат, сложенный зернами медистой самородной платины состава $Pt_{0.70}Fe_{0.15}Cu_{0.10}Os_{0.04}Rh_{0.01}$, сцементированных более «чистой» самородной платиной состава $Pt_{0.82}Fe_{0.08}Cu_{0.10}$, слагающей тонкие (2—4 мкм) прослойки между отдельными зернами. С этими прослойками ассоциирует неназванное соединение сложного состава, приблизительно соответствующего формуле IrO_2 , замещающее пластинчатые кристаллы самородного осмия (см. рис. 3, б). Образование оксида иридия может происходить только в условиях высокой фугитивности кислорода. Таким образом, пространственное сонахождение этих минералов можно объяснить их совместным образованием под воздействием флюида, характеризующегося высоким значением f_{O_2} , в результате которого самородный осмий был замещен оксидом иридия, а первичная самородная платина утратила часть железа вследствие его окисления.

Процесс образования оксида иридия также требует объяснения. Как было сказано ранее, по морфологическим признакам установлено, что это соединение образовалось вследствие замещения самородного осмия. Учитывая, что содержание иридия в самородном осмии рассматриваемой ассоциации не превышает 12 мас. %, можно предположить, что в процессе образования оксида иридия большая часть осмия была вынесена. Как известно, одной из трудностей при аналитическом определении осмия является возможность его перехода из раствора в газ OsO_4 , который является летучим уже при температуре в 105 °С [Hoffman, Dun, 2002]. Таким образом, вероятно, что в окислительных условиях основная часть осмия улетучилась, в то время как иридий образовал устойчивое соединение IrO_2 .

Среди других особенностей состава Pt-Fe сплавов следует отметить низкое содержание иридия при достаточно высоком содержании осмия. Подобное соотношение примесей типично для платины

Таблица 5. Состав хромшпинелидов, находящихся в сростании с платиной и из клинопироксенитов массивов Таманваямской группы, мас. %

№ п/п	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Сумма
1	2.77	6.74	6.17	75.84	—	6.49	98.01
2	2.59	6.81	9.41	72.63	0.55	7.20	99.19
3	2.49	6.76	12.35	69.48	0.58	6.65	98.31
4	2.51	6.94	12.15	72.22	—	6.75	100.57
5	0.43	9.23	35.23	42.31	0.44	11.54	99.17
6	0.61	9.63	42.00	36.12	1.17	7.98	97.51
7	0.58	9.72	42.05	37.10	1.29	7.65	98.39
8	0.79	7.86	41.77	39.51	0.88	7.44	98.25
9	0.49	10.49	46.23	28.96	0.55	12.59	99.31

Примечание. 1, 2 — хроммагнетиты из клинопироксенитов массивов таманваямской группы; 3, 4 — хроммагнетиты из сростаний с платиной; 5—9 — хромиты из сростаний с платиной.

россыпей, связанных с массивами, характеризующимися малым эрозионным срезом, т.е. связанных с эрозией апикальных частей дренированных массивов, и хорошо согласуется с рассмотренным выше низким содержанием железа в Pt-Fe сплавах [Tolstykh et al., 2000a; Сидоров и др., 2009].

Другой необычной особенностью Pt-Fe сплавов рассматриваемой ассоциации является высокое содержание меди в изоферроплатине и самородной платине, достигающее 5 мас. %. Известно, что минералы системы Pt—Fe—Cu часто замещают первичные Pt-Fe сплавы — характерными примерами являются туламинит и тетраферроплатина. Можно было бы предположить, что их образование также связано с процессами вторичного изменения первичной изоферроплатины и самородной платины, однако для туламинита и тетраферроплатины обычно нахождение в виде каемок замещения первичных Pt-Fe сплавов, отсутствие которых в данном случае свидетельствует против этого предположения. Вероятно, платина с высоким содержанием меди в данном случае является первичной.

Для ассоциации россыпи ручья Прижимный характерно широкое развитие сульфидной минерализации. Среди сульфидов можно выделить раннюю ассоциацию, к которой с уверенностью можно отнести один минерал — лаурит, и позднюю, в составе которой преобладают куперит и минералы группы тиошпинелей — купрородсит, купроиридисит и маланит. Для куперита характерен состав, близкий к идеальному PtS, в то время как все тиошпинели являются промежуточными членами изоморфных рядов. Процесс замещения платины куперитом и тиошпинелями был описан в литературе [Корякско-Камчатский..., 2002; Сидоров, 2009; Tolstykh et al., 2002, 2005]. Нами были обнаружены контрастные каймы замещения платины куперитом и маланитом, при этом последовательность минералообразования была следующей: платина—куперит—маланит—куперит (см. рис. 3, ж). Это может быть объяснено как колебаниями температуры, так и изменчивостью фугитивности серы в процессе замещения, так как кристаллизация маланита происходит при большем значении f_{S_2} и при меньшей температуре, чем кристаллизация куперита [Makovicky, 2002]. Возможно также предположить совместное влияние этих параметров на процесс замещения платины сульфидами.

Все рассмотренные тиошпинели являются промежуточными членами изоморфного ряда купрородсит—маланит—купроиридисит. Они были неоднократно описаны в связи с россыпями, приуроченными к массивам урало-аляскинского типа [Рудашевский и др., 1985; Подлипский и др., 1999; Tolstykh et al., 2002, 2005]. Отличием изученных тиошпинелей является отсутствие в их составе железа.

Арсениды и сульфоарсениды были встречены в единичном зерне, поэтому можно говорить о том, что они не характерны для рассматриваемой ассоциации. Они представлены сперрилитом и минералом, по составу являющимся промежуточным между сперрилитом и холлингвортитом. В одном из зерен отмечено замещение маланита с рассчитанной формулой $Cu_{1.04}(Pt_{1.07}Rh_{0.92})_{1.99}S_{3.97}$ незазванным интерметаллидом состава $Pt_{0.51}Rh_{0.49}$. Обращает на себя внимание близость отношения платины и родия в этих двух соединениях. Вероятно, после стадии образования вторичных сульфидов имел место процесс, приведший к восстановлению этих металлов до самородного состояния, сопровождавшийся выносом меди и серы. Как было отмечено ранее, схожее замещение сульфидов интерметаллидами характерно для массивов урало-аляскинского типа — замещение сульфидов ЭПГ (бауита и кашинита) интерметаллидами было описано для Каменушинского массива на Урале [Толстых и др., 2011].

Особый интерес представляют полиминеральные сульфидные включения, сложенные куперитом, борнитом, халькопиритом, купрородситом, палладистой изоферроплатиной и висоцкитом. Эти включения можно подразделить на два морфологических типа. Первый тип представлен на рис. 3, к, л. На этом рисунке можно видеть округлое включение, представляющее собой агрегат палладистой изоферроплатины, борнита и висоцкита. Второй тип отличается идиоморфизмом некоторых минералов, который позволил установить следующий порядок минералообразования: купрородсит—куперит—борнит—халькопирит (см. рис. 3, м).

Особенно ценную для понимания источника рассмотренной минерализации информацию несут включения хромшпинелидов, среди которых прослеживаются две группы. К первой из них относятся хромиты, по своему составу близкие к хромитам дунитов массивов урало-аляскинского типа (см. рис. 4, в). Они представлены изометричными кристаллами, включенными в Pt-Fe матрицу (см. рис. 2, а, 3, з). Ко второй группе относятся хроммагнетиты. Для них характерны два морфологических типа. Хроммагнетиты первого типа, так же как и хромиты, представлены изометричными зернами, включенными в платину (см. рис. 3, в, з). Можно предположить, что их образование является следствием замещения хромита в процессе серпентинизации [Бетехтин, 1954; Плаксенко, 1989; Сидоров и др., 2012]. Хроммагнетит второго морфологического типа (см. рис. 3, е) представлен ксеноморфными обособлениями, заполняющими межзерновое пространство кристаллов платины. Ввиду того, что подобные формы не характерны для кристаллов хромита, для хроммагнетита второго морфологического типа наиболее вероятно первичное происхождение. Это является дополнительным аргументом в пользу предположения о том, что коренным источником для самородной платины наряду с дунитами могли быть верлиты и клинопироксениты. Следует отметить, что отсутствие дунитов на геологических схемах Прижимного

массива и других массивов таманваямской группы может быть следствием того, что дунитовые тела были пропущены при геологической съемке, либо перекрыты четвертичными ледниковыми отложениями, широко развитыми в пределах рассматриваемой территории.

Другим гипотетическим источником для рассматриваемой россыпной ассоциации являются тела пикритов, расположенные в области питания россыпи. На данный момент известны единичные находки Pt-Fe минералов в пикритах [Kamenetsky et al., 2015]. Однако с учетом обоснованного выше соответствия рассматриваемой ассоциации россыпям, связанным с концентрически-зональными массивами, вероятность того, что пикриты могли быть ее источником, крайне мала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная платинометалльная ассоциация по своему составу близка к ассоциациям россыпей, связанных с массивами урало-алаянского типа. Об этом свидетельствует преобладание в россыпи Pt-Fe сплавов, состав Os-Ir-Ru сплавов и хромшпинелидов, находящихся в сростании с платиной.

Согласно существующей модели [Некрасов и др., 1994; Tolstykh, 2000a; Сидоров, 2009], низкое содержание железа в Pt-Fe сплавах может свидетельствовать о том, что массив, послуживший коренным источником для рассматриваемой ассоциации, характеризуется незначительной глубиной эрозийного среза и в его составе должны преобладать клинопироксениты, что полностью согласуется с геологическими данными. При этом отсутствие сведений о дунитах на существующей геологической карте может быть объяснено их перекрытием ледниковыми отложениями на этапе, последовавшем за образованием россыпи. Кроме того, дуниты могли быть пропущены при геологической съемке.

На магматической стадии рудномагматическая система характеризовалась повышенным значением фугитивности кислорода, что привело к преобладанию самородной платины над изоферроплатиной. На поздней, флюидно-магматической стадии система характеризовалась высоким значением фугитивности серы, что привело к широкому развитию вторичной сульфидной минерализации.

На поздней стадии также имел место окислительный процесс, природа которого на данный момент не вполне ясна. Этот процесс привел к замещению платины более «чистой» разностью и развитию псевдоморфоз состава IrO₂ по самородному осмию.

ЛИТЕРАТУРА

Бетехтин А.Г. Коренные месторождения платины на Урале // Минералогия Урала. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 25—57.

Высоцкий Н.К. Платина и районы ее добычи. Петроград, Комиссия по изучению естественных производительных сил России РАН, 1923, 243 с.

Карта полезных ископаемых Камчатской области м-ба 1:500 000. Краткая объяснительная записка. Каталог месторождений, проявлений, пунктов минерализации и ореолов рассеяния полезных ископаемых / Ред. Ю.Ф. Фролов. СПб., ВСЕГЕИ 1999, 562 с.

Корякско-Камчатский регион — новая платиноносная провинция России / Е.Ю. Вильданова, В.П. Зайцев, Л.И. Кравченко и др. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2002, 383 с.

Кепежинская П.К., Ефремова Л.Б., Сорокина Н.А. Редкоземельные элементы в раннеостроводужных плутонических комплексах Корякского нагорья // Геохимия, 1991, №4, с. 548—556.

Косыко М.К., Радченко Н.С., Савельев Н.А. Геологическая карта СССР, м-ба 1:200 000. Корякская серия. Лист Р-59-XXVIII. М., 1972, 86 с.

Кутыев Ф.Ш., Сидоров Е.Г., Резниченко В.С., Семенов В.Л. Новые данные о платиноидах в зональных ультраосновных комплексах юга Корякского нагорья // Докл. АН СССР, 1991, т. 317, № 6, с. 1458—1461.

Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О. Платинометалльная минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. Л., Недра, 1992, 217 с.

Малич К.Н., Баданина И.Ю. Железо-платиновые сплавы хромитов Нижнетагильского и Кондерского клинопироксенит-дунитовых массивов (Россия) // ДАН, 2015, т. 462(6), с. 692—695.

Малич К.Н., Степанов С.Ю., Баданина И.Ю., Хиллер В.В. Минеральные ассоциации платиноидов Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского клинопироксенит-дунитовых массивов (Средний Урал, Россия) // Вестник УО РМО, 2015, № 12, с. 65—83.

Мочалов А.Г. «Шлиховая платина» россыпей Дальнего Востока России: Автореф. дис. ... д. г.-м.н. М., ИГЕМ, 2001, 48 с.

Некрасов И.Я., Ленников А.М., Октябрьский Р.А., Залищак Б.Л., Сапин В.И. Петрология и платиноносность кольцевых щелочно-ультраосновных комплексов / Ред. Н.П. Лавров. М., Наука, 1994, 381 с.

Оюунчимэг Т., Изох А.Э., Вишневский А.В., Калугин В.М. Изоферроплатиновая ассоциация минералов из россыпи реки Бургастайн-Гол (Западная Монголия) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (10), с. 1119—1130.

Плаксенко А.Н. Типоморфизм аксессуарных хромшпинелидов ультрамафитовых магматических формаций. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1989, 224 с.

Подлипский М.Ю., Сидоров Е.Г., Толстых Н.Д., Кривенко А.П. Кобальтсодержащий маланит и другие тиошпинели платины из россыпных проявлений реки Майор (Камчатка) // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (4), с. 645—648.

Рудашевский Н.С., Меньшиков Ю.П., Мочалов А.Г., Трубкин Н.В., Шумская Н.И., Жданов В.В. Купрородсит (CuRh_2S_4), купроиридсит (CuIr_2S_4) — новые природные тиошпинели платиновых элементов // ЗапВМО, 1985, т. 114, № 2, с. 187—195.

Сидоров Е.Г. Платиноносность базит-гипербазитовых комплексов Корякско-Камчатского региона: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Петропавловск-Камчатский, ИВДВО РАН, 2009, 46 с.

Сидоров Е.Г., Козлов А.П., Толстых Н.Д. Гальмоэнанский базит-гипербазитовый массив и его платиноносность. М., Научный мир, 2012, 288 с.

Толстых Н.Д., Кривенко А.П., Батулин С.Г. Особенности состава самородной платины из различных ассоциаций минералов элементов платиновой группы // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (3), с. 39—46.

Толстых Н.Д., Телегин Ю.М., Козлов А.П. Коренная платина Светлоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала // Геология и геофизика, 2011, т. 52(6), с. 775—793.

Cabri L.J., Feather C.E. Platinum-iron alloys: nomenclature based on a study of natural and synthetic alloys // Can. Miner., 1975, v. 13, p. 117—126.

Hoffman E., Dunn B. Sample preparation and bulk analytical methods for PGE // The geology, geochemistry, mineralogy and Mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri, Can. Inst. Mining, Metall. Petrol., 2002, v. 54, p. 1—12.

Johan Z. Alaskan-type complexes and their platinum-group element mineralization // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri, Can. Inst. Mining, Metall. Petrol., 2002, v. 54, p. 669—720.

Kamenetsky V.S., Park J.-W., Mungall J.E., Pushkarev E.V., Ivanov A.V., Kamenetsky M.B., Yaxley G.M. Crystallization of platinum-group minerals from silicate melts: evidence from Cr-spinel-hosted inclusions in volcanic rocks // Geology, 2015, v. 43, p. 903—906.

Kepezhinskas P.K., Taylor R.N., Tanaka H. Geochemistry of plutonic spinels from the North Kamchatka arc: comparisons with spinels from other tectonic settings // Miner. Magazine, 1993, v. 57, p. 575—589.

Kessel R., Beckett J.R., Stolper E.M. Thermodynamic properties of the Pt-Fe system // Am. Miner., 2001, v. 86, p. 1003—1014.

Krause J., Brüggmann G.E., Pushkarev E.V. Accessory and rock forming minerals monitoring the evolution of zoned mafic-ultramafic complexes in the Central Ural Mountains // Lithos, 2007, v. 95, p. 19—42.

Legendre O., Augé T. Alluvial platinum-group minerals from the Manampotsy area, East Madagascar // Austr. J. Earth Sci., 1992, v. 39, №3, p. 389—404.

Makovicky E. Ternary and Quaternary systems with PGE // The geology, geochemistry, mineralogy and mineral beneficiation of platinum-group elements / Ed. L.J. Cabri. Can. Inst. Mining, Metall. Petrol., 2002, v. 54, p. 131—176.

Malitch K.N., Thalhammer O.A.R. Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: a structural, compositional and osmium-isotope study // Can. Miner., 2002, v. 40, p. 395—418.

Malitch K.N., Badanina I.Yu. Iron-platinum alloys from chromitites of the Nizhny Tagil and Kondyor clinopyroxenite-dunite massifs (Russia) // Dokl. Akad. Earth Sci., 2015, v. 462, № 2, p. 634—637.

Stepanov S.Yu., Malitch K.N., Kozlov A.V., Badanina I.Yu., Antonov A.V. Platinum group element mineralization of the Svetly Bor and Veresovy Bor clinopyroxenite-dunite massifs, Middle Urals, Russia // Geol. Ore Deposits, 2017, v. 59, p. 244—255.

Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., Krivenko A.P., Podlipsky M.Yu. The association of platinum-group minerals of the Pustaya River, Kamchatka, Russia // Can. Miner., 2000a, v. 38, p. 1251—1264.

Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Lavrentyev Y.G., Tolstykh O.N., Korolyuk V.N. Oxides of the Pd-Sb-Bi system from the Chiney Massif (Aldan Shield, Russia) // Eur. J. Miner., 2000b, v. 12, p. 431—440.

Tolstykh N.D., Krivenko A.P., Sidorov E.G., Laajoki K.V.O., Podlipsky M.Yu. Ore mineralogy of PGM placers in Siberia and the Russian Far East // Ore Geol. Rev., 2002, v. 20, p. 1—25.

Tolstykh N.D., Sidorov E.G., Krivenko A.P. Platinum-group element placers associated with Ural-Alaska type complexes / Ed. J.E. Mungall // Exploration for platinum-group element deposits. Short course ser. MAC, 2005, v. 35, Chap. 6, p. 113—143.