

## ПЛАТИНОМЕТАЛЬНОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ВЕРЛИТ-ПИРОКСЕНИТОВОГО КОМПЛЕКСА МАССИВА СРЕДНИЙ КРАКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОГО ОСВОЕНИЯ

© 2018 г. Д. Е. Савельев<sup>1</sup>, С. Р. Калмукашев<sup>2</sup>, И. И. Мусабилов<sup>3</sup>

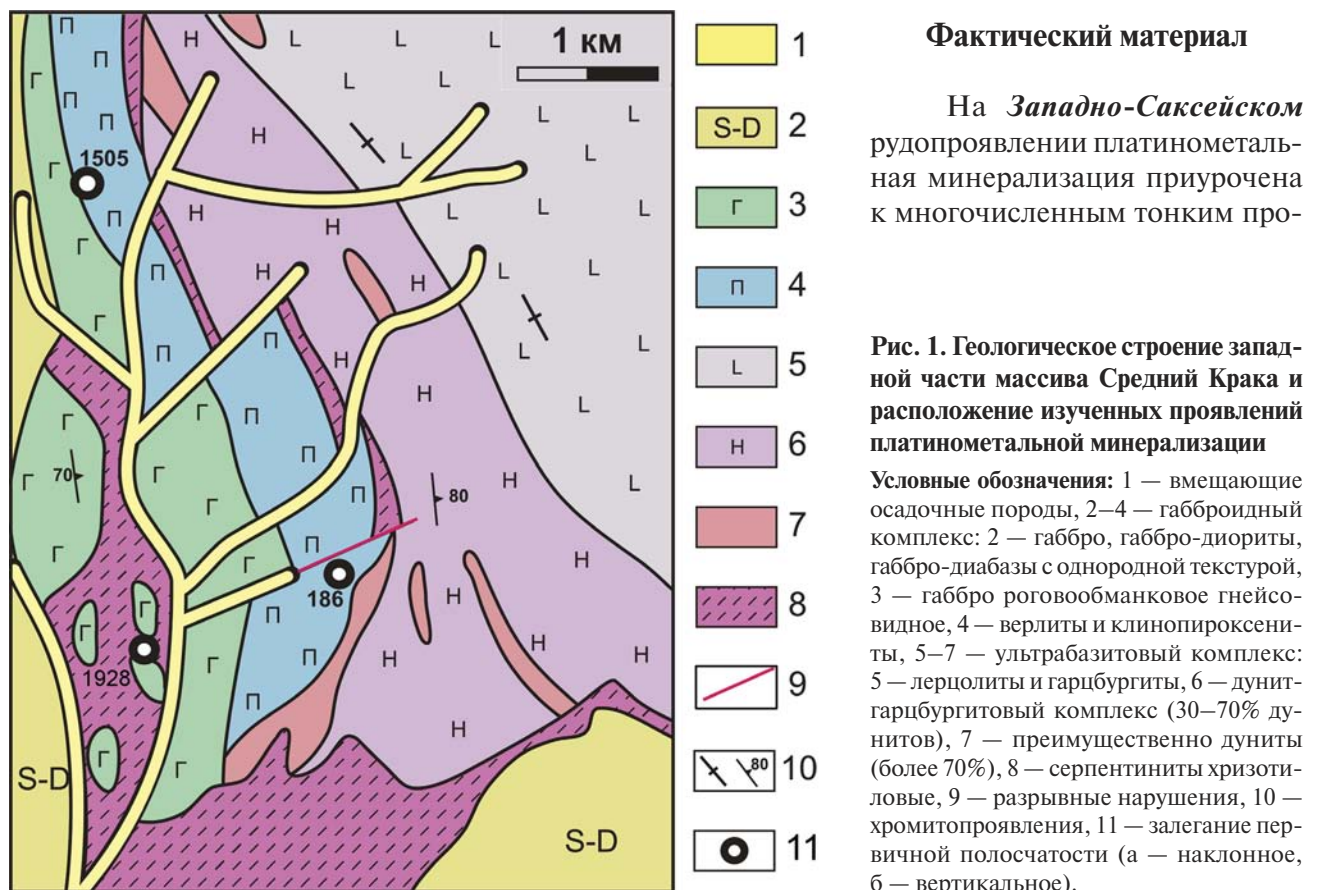
<sup>1</sup> Институт геологии УФИЦ РАН, г. Уфа. E-mail: savl71@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «Ротор», г. Баймак. E-mail: satvaldekalmukasev@gmail.com

<sup>3</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа. E-mail: irektmusabirov@mail.ru

### Геологическая обстановка

Офиолитовый массив Средний Крака сложен преимущественно шпинелевыми перидотитами, слагающими его восточную и центральную части, в западном направлении они сменяются мощным горизонтом краевых дунитов, переходным мантийно-коровым ультрамафитовым комплексом и габброидами. Перспективы обнаружения промышленно-значимых объектов с благороднометальной минерализацией на массиве Средний Крака связаны в первую очередь с узкой полосой ультрамафитов непосредственно ниже основания габброидного разреза, включающей верлиты, клинопироксениты, вебстериты, аподунитовые серпентиниты (рис. 1). Протяженность выходов пород данной ассоциации составляет не менее 5 км, а видимая мощность изменяется от 200 до 600 м. Данные опробования, проведенного в разные годы [2, 3, 4], показали, что потенциально рудоносными являются три ассоциации: 1) хромитит-пироксенитовая, 2) клинопироксенитовая малосульфидная и 3) магнетитовых верлитов и клинопироксенитов. В данном сообщении мы ограничимся описанием трех проявлений платинометальной минерализации, связанной с хромититами.

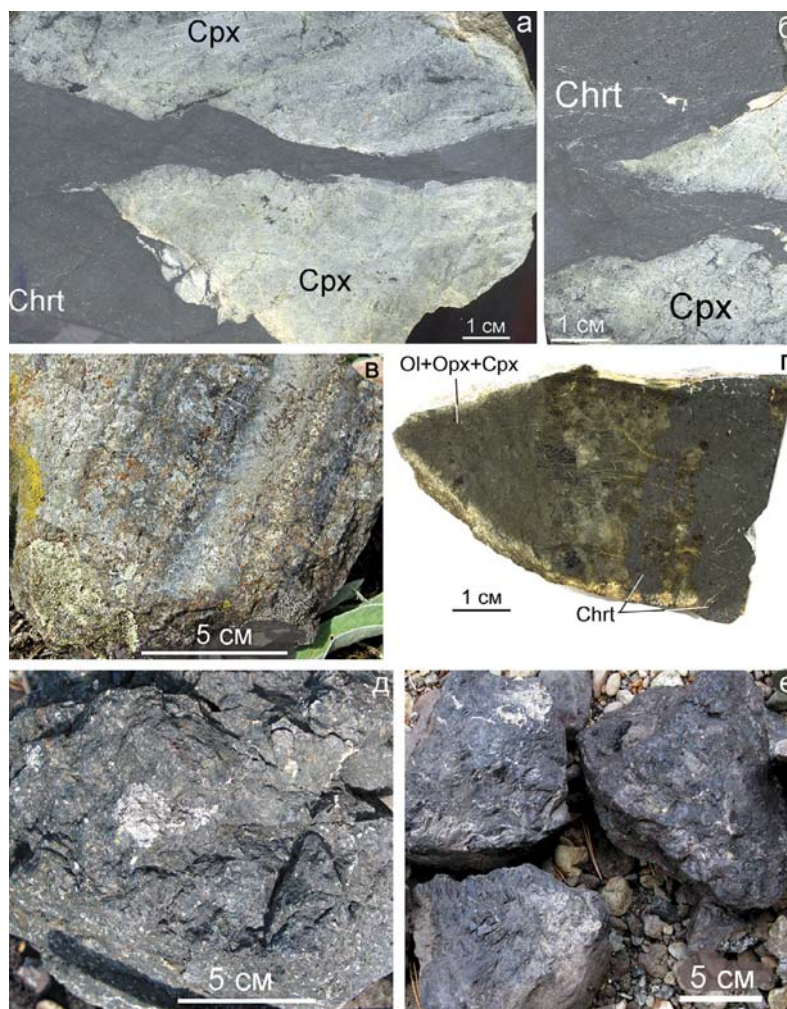


жилкам железистых хромититов в светло-зеленых клинопироксенитах (рис. 2а, б). Пироксениты обладают массивной текстурой и порфирукластической структурой, что указывает на среднетемпературные хрупко-пластические деформации, которые претерпели породы перед становлением. Размеры кристаллов породообразующего диопсида изменяются в значительном диапазоне — от первых см до 0.п мм, мелкозернистые агрегаты окружают по периферии деформированные крупные кристаллы пироксена.

Хромититы образуют либо штокверки из тонкой сети прожилков, либо шпировоподобные и линзовидные выделения, часто на трещинах отдельности массивных участков хромититов можно наблюдать зеркала скольжения. Суммарное содержание элементов платиновой группы в пробах варьирует от 0.9 до 4.14 г/т (табл. 1) при ведущей роли платины ( $Pt > Pd \gg Rh \approx Ir > Ru \approx Os$ ).

Изучение минералогических особенностей хромититов позволило выявить широкое распространение в них включений минералов платиновой группы (МПГ). Ведущая роль среди МПГ принадлежит твердым растворам на основе платины, в состав которых обычно также входят железо, никель, медь. Количество обнаруженных выделений твердых растворов на основе платины составляет около 75% от общего количества МПГ на проявлении.

Значительно реже в хромититах встречаются сульфиды элементов платиновой группы (ЭПГ), главным образом брэггит (рис. 3). Для него характерен варьирующий состав, часто отмечается



**Рис. 2. Образцы платиноносных ультрамафитов переходного мантийно-корового комплекса офиолитового массива Средний Крака**

а, б — клинопироксениты с жилами сплошных мелкозернистых хромититов на Западно-Саксейском проявлении; в, г — оливиновые вебстериты с тонкими полосами вкрапленных хромититов на Логиновском проявлении; д, е — обломки массивного крупнозернистого хромитита в элювиально-делювиальном проявлении на руч. Черный Ключ.

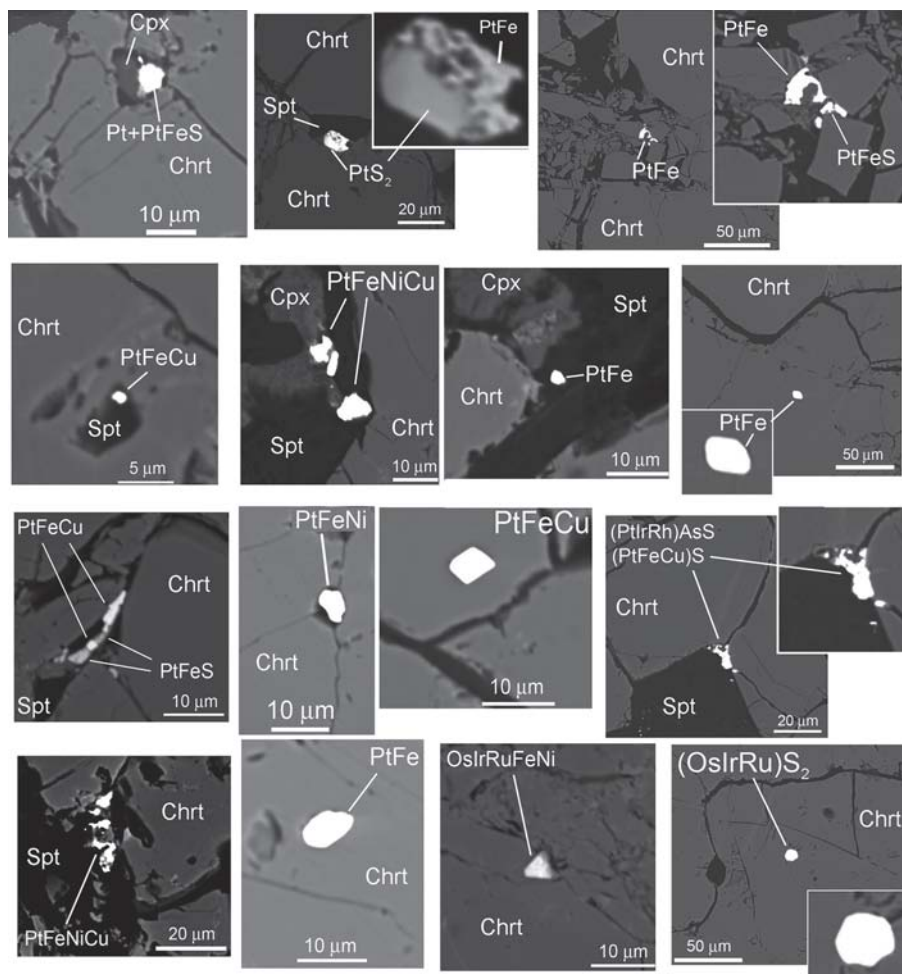
примесь железа. Выделения брэггита составляют около 20% от общего количества выявленных зерен МПГ. Остальные минералы платиноидов пользуются значительно меньшим распространением. Встречены единичные выделения сульфидов ряда лаурит – эрликмант, сульфоарсениды сложного состава (рис. 3).

Таблица 1

**Содержание элементов платиновой группы и золота в породах габброидного комплекса и хромититах массива Средний Крак (мг/т)**

№ п/п	Рудопроявление	№ обр.	Pt	Pd	Rh	Ru	Ir	Os	Au	сумма
1	Западно-Саксейское	СК-99-186/4	530	130	30	—	30	н/о	н/о	720
2		СК-99-186/3	1640	470	110	60	110	н/о	н/о	2390
3		СК-186	4140	—	н/о	н/о	н/о	н/о	н/о	4140
4		СК-785	200	320	—	—	—	н/о	2000	2520
5	Логиновское	СК-1505-1	806	476	92	459	176.9	85.2	н/о	2095
6		СК-1505-4	8	103.4	11	6.7	7.7	16.3	н/о	153
7		СК-1505-Б2	473	305.5	52	180.6	126.2	76.6	н/о	1214
8	Черноключенское	СК-1900	10	138.8	20.8	127	84.7	229.8	н/о	611
9		СК-1928	12	190.6	44.2	87.3	104.5	74.7	н/о	513

**Примечание:** прочерк означает, что содержание элемента ниже предела обнаружения, н/о — содержание не определялось. Анализы выполнены следующими методами: 1, 2, 4 — атомно-абсорбционным в ИГЕМ РАН, 35 — ICP-MS в ПГНИУ, 5–9 — ICP-MS в ИГХ СО РАН по методике [1].



**Рис. 3. Минералы платиновой группы в хромититах Западно-Саксейского проявления**

Изображения в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин, Cpx — клинопироксен.



С целью изучить практическую значимость платиносодержащих руд Западно-Саксейского проявления нами были проведены лабораторные эксперименты по обогащению хромитит-клинопироксенитовых жил гравитационными методами. Пробы дробились и измельчались до получения фракции –74 мкм, а затем подвергались мокрой схеме обогащения на концентрационном столе и отсадке. В результате были получен концентрат ПХ-2, выход которого составил 185 г при массе исходной пробы 5 кг при выходе концентрата 3.7%. Изучение состава исходной пробы, концентрата и хвостов обогащения проведено рентгено-флюоресцентным методом на установке Thermo Fisher Scientific (табл. 2).

Суммарное содержание ЭПГ и Au в полученном концентрате составило 60 г/т, что превышает концентрацию тех же элементов в исходной пробе (по данным ICP-MS) в 30–40 раз, что свидетельствует о достаточно высокой извлекаемости полезного компонента при выбранном методе

Таблица 2

**Химический состав исходной пробы СК-186 и полученных концентратов**

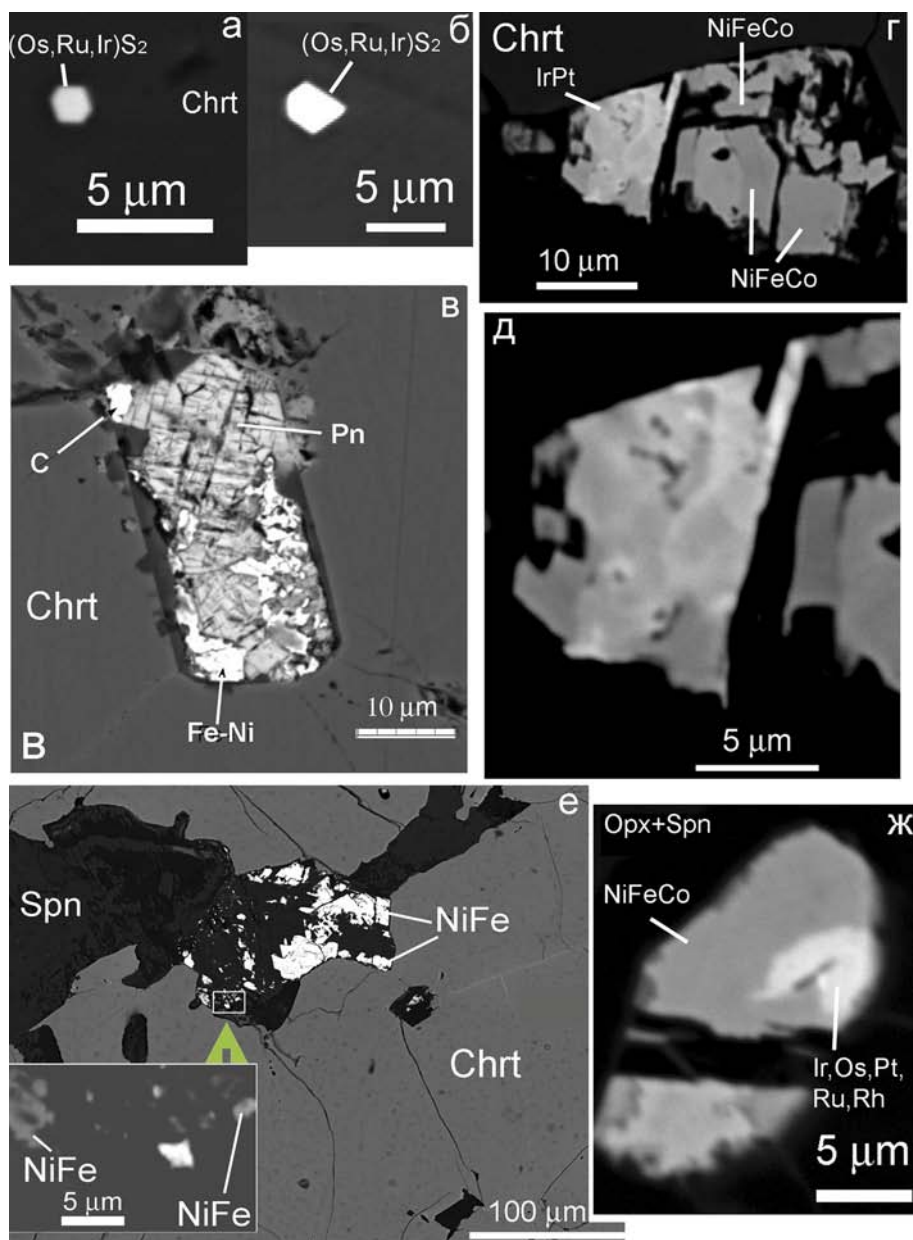
№ пробы	ед.изм	ПХ-01	ПХ-02	ПХ-03	ПХ-04	Est.Er
SiO <sub>2</sub>	мас. %	41.51	18.28	35.53	38.61	0.19
TiO <sub>2</sub>	мас. %	0.47	1.4	0.8	0.61	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	мас. %	2.94	5.99	3.15	3.23	0.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	мас. %	10.37	29.37	14.51	13.58	0.23
MnO	мас. %	0.17	0.32	0.22	0.2	0.016
MgO	мас. %	20.1	12.01	16.16	18.01	0.16
CaO	мас. %	17.28	6.85	17.28	16.18	0.13
Na <sub>2</sub> O	мас. %	0.09	–	0.123	0.14	0.0079
K <sub>2</sub> O	мас. %	0.01	0.002	0.004	0.015	0.0004
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	мас. %	6.79	24.82	11.86	9.03	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	мас. %	0.01	0.04	0.004	0.01	0.0036
SO <sub>3</sub>	мас. %	–	0.15	0.06	0.08	0.0075
V	ppm	–	1550	770	598	77
Ni	ppm	394	764	435	425	38
Co	ppm	114	290	149	141	14
Cu	ppm	95	563	152	220	28
Zn	ppm	245	1070	413	398	54
Sc	ppm	29	–	22	–	3
Mo	ppm	39	–	49	27	6
Pb	ppm	–	27	–	10	9
Hf	ppm	–	10	–	14	9
Sr	ppm	19	–	25	19	4
Ga	ppm	10	42	17	–	2
Ce	ppm	29	285	–	36	52
Pr	ppm	36	455	–	69	85
Nd	ppm	–	–	–	17	16
Sm	ppm	69	233	105	95	61
Tb	ppm	29	81	50	0	62
Gd	ppm	17	85	23	33	22
Au	ppm	–	<b>25</b>	–	–	6
Pd	ppm	–	<b>13</b>	–	–	10
Pt	ppm	–	<b>18</b>	–	–	6
Ir	ppm	–	<b>12</b>	–	–	6

**Примечание:** прочерк означает, что концентрация компонента ниже предела обнаружения; ПХ-01 — исходный материал, ПХ-02 — концентрат гравитационного обогащения (концентрационный стол), ПХ-03 — легкая фракция, ПХ-04 — тонкодисперсная фракция, слив дезинтегратора, Est.Er. — ошибка измерения.

обогащения и позволяет рассматривать проявления данного типа как перспективный источник благородных металлов.

На *Логиновском* рудопроявлении платинометальная минерализация связана с маломощными жилами вкрапленных хромититов, локализованными в оливиновых вебстеритах и перидотитах переходного комплекса. По данным геохимического исследования, содержание ЭПГ варьирует от 0.15 до 2.1 г/т (табл. 1). Минералогическое изучение образцов показало, что в хромититах и вмещающих пироксенитах и перидотитах широким распространением пользуются псевдоморфозы по первичным сульфидам, состоящие из агрегатов пирротина, пентландита, аваруита, твердых растворов Ni-Fe-Co состава, самородной меди и оксидов железа (рис. 4).

Из минералов платиноидов встречены собственные минералы рутения, осмия, платины и палладия. Минералы изоморфного ряда лаурит – эрликманит образуют идиоморфные кристаллы различных сечений в хромите (рис. 4а, б). Плюмбопалладинит встречен совместно с пентландитом, пирротинном, железистым никелем и магнетитом в составе сложных псевдоморфоз по неизвестному



**Рис. 4.** Минералы платиновой группы в хромититах Логиновского проявления  
Изображения в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, Spn — серпентин, Opх — клинопироксен.

минералу, который образует идиоморфные и округлые выделения в хромите (рис. 4в). В интерстициях зерен хромшпинелидов встречены зерна платины, а также твердых растворов на основе Ni-Fe-Co, характеризующиеся неоднородным составом, и включающие значимые количества ЭПГ, в частности, иридия, платины, осмия, родия и рутения (рис. 4г–ж). Широкое распространение в породах сложных по строению псевдоморфоз, главными составными частями которых являются аналогичные по составу Ni-Fe-Co фазы, позволяет предполагать, что именно с ними связаны повышенные содержания платиноидов на данном проявлении. При содержании в них ЭПГ на уровне 0.п%, последние не могут быть идентифицированы по BSE изображениям и рентгено-спектральным анализам. Вместе с тем при таких концентрациях и содержании в породе данных фаз в количестве 0.п об.%, общая концентрация ЭПГ составит первые г/т, что является промышленно-значимым показателем. В этой связи при дальнейших исследованиях важное значение приобретает применение методов высокоразрешающего локального микроанализа, например, LA-ICP-MS.

В массивных хромититах элювиально-делювиального проявления на руч. Черный Ключ (*Черноключенского*) содержание элементов платиновой группы составляет 0.5–0.6 г/т (табл. 1). Металлы платиновой группы обнаружены в составе трех фаз — твердого раствора состава Ru–Os–Ir–Ni–Fe, сульфидов рутения и осмия (ряд лаурит – эрликманит) и сульфоарсенидов состава Ir–Pt–Rh–Ni–Cu–Fe–As–S, близких к ирарситу. В большинстве анализов встречается примесь хрома, присутствие которого скорее всего связано с захватом материала вмещающего хромита. Твердые растворы рутения, осмия и иридия встречены в виде отдельных зерен «кристалломорфных» очертаний размером 2–15 мкм (рис. 5) внутри серпентиновых выделений в хромите, непосредственно на контакте с хромитом, либо внутри зерен хромита, но всегда с небольшой серпентиновой оторочкой. Небольшой размер большей части изученных выделений обуславливает неточность в определении количественного химического состава и присутствие хрома, заимствованного из матрикса. Помимо хрома, в составе твердых растворов всегда отмечается значительное количество никеля и железа.

Сульфиды ряда лаурит – эрликманит встречены в виде включений непосредственно в зернах хромита, для них характерен идиоморфный габитус (рис. 5в) и размер в первые микроны. В составе минерала концентрация рутения несколько выше (28–31 мас.%), чем осмия (24–25 мас.%), отмечается присутствие иридия в количестве 7–9 мас.%. Наиболее крупные выделения сульфо-

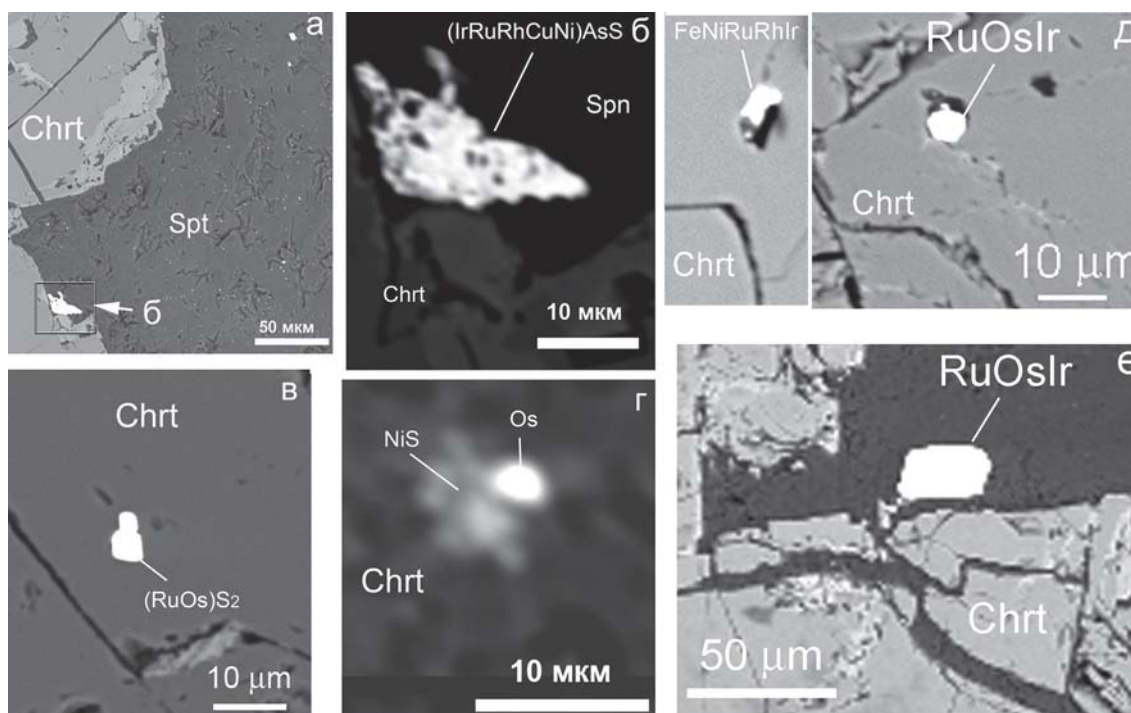


Рис. 5. Минералы платиновой группы в хромититах Черноключенского проявления

Изображения в режиме BSE; Chrt — хромшпинелид, Spt — серпентин.

арсенида, близкого по составу к ирарситу, наблюдаются на границе серпентинового включения и хромитита (до 20–25 мкм). Для минерала характерен неоднородное строение (рис. 5а, б), при этом внешняя часть минерала и тонкие ответвления сложены более легкими элементами. В его составе основная роль из металлов принадлежит иридию (33–51 мас. %), постоянно присутствует родий (3–15 мас. %), в отдельных анализах обнаружена платина (до 5.9 мас. %).

### Обсуждение результатов

Во всех изученных образцах платинометалльная минерализация преимущественно приурочена к включениям силикатного состава среди хромититов. Эти участки располагаются обычно или на сочленении нескольких зерен хромита, или представляют собой включения в кристаллах хромшпинелидов. Минералы МПГ являются как бы «пойманными» в силикатные ловушки. Значительно реже выделения платиноидов встречаются в виде мономинеральных включений в хромите либо кристаллизуются в трещинах, заполненных серпентином.

В хромититах Логиновского проявления агрегаты, состоящие из твердых растворов Fe–Ni–Cu–PGE состава, часто замещают сингенетичные по отношению к хромититам включения высоко-температурных твердых растворов сульфида никеля и железа + металл (округлые включения) или сульфидов хизлевудит + пентландит (кристаллические включения). В таких же включениях встречаются субмикронные участки, обогащенные иридием. При серпентинизации включения замещаются агрегатом никелистого железа, в которых также фиксируются участки, обогащенные иридием.

Для хромититов Западно-Саксейского и Логиновского рудопроявлений весьма типична мелкозернистая структура и массивная текстура, обусловленная весьма компактным расположением зерен хромшпинелидов. При микроскопическом изучении хромититов обращает на себя внимание широкое распространение «напряженных контактов» зерен хромшпинелидов, что вообще является типичным для месторождений в офиолитовых комплексах, большая часть из которых локализована внутри мантийной части разреза. Однако в рассматриваемых случаях аналогичные структурные взаимоотношения установлены внутри так называемого «кумулятивного» разреза офиолитов. Наиболее логичным объяснением наблюдаемых взаимоотношений минералов и их компактной локализации в почти мономинеральных агрегатах является предположение о механизме их образования, аналогичном спеканию под давлением — «синтерингу» [5]. При действии данного механизма более «мягкие» и легкоплавкие фазы, такие как клинопироксен, оливин, серпентин выжимались из интерстиций в хромититах в зоны пониженного давления.

### Выводы

Генезис хромит-платинометалльной минерализации на данной стадии изучения представляется дискуссионным. С одной стороны, приуроченность к «кумулятивной» части разреза предполагает участие магматических процессов в его формировании. С другой стороны, хромититы имеют признаки «напряженных» структур, а приуроченность выделений МПГ к силикатным обособлениям указывает скорее всего на постмагматическую природу выделений. Одним из вероятных объяснений может быть твердофазное образование из примесных элементов хромшпинелидов собственных минералов МПГ, инициируемое рекристаллизацией минерала-хозяина в условиях уплотнения.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0252-2017-0014. Аналитические исследования проведены на базе ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».*

### Литература:

1. *Меньшиков В.И., Власова В.Н., Ложкин В.И., Сокольникова Ю.В.* Определение элементов платиновой группы в горных породах методом ИСП-МС с внешней градуировкой после отделения матричных элементов на катионите КУ-2-8 // Аналитика и контроль. — 2016. — Т. 20, № 3. — С. 190–201. — DOI: 10.15826/analitika.2016.20.3.003.

2. Савельев Д.Е., Илалтдинов И.Я., Бажин Е.А. К проблеме практического использования вкрапленных хромовых руд Саксей-Ключевской площади массива Средний Крака (Южный Урал) // Вестник Пермского университета. Геология. – 2016. – № 1. – С. 88–99.
3. Савельев Д.Е., Белогуб Е.В., Зайков В.В., Сначев В.И., Котляров В.А., Блинов И.А. Платинометальная минерализация в ультрамафитах массива Средний Крака (Южный Урал) // Руды и металлы. – 2014. – № 6. – С. 33–42.
4. Сначев В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В. Петрогеохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. – Уфа, ИГ УНЦ РАН, 2001. – 213 с.
5. Johnson C. Podiform chromite at Voskhod, Kazakhstan: Ph. D. thesis. – Cardiff Uni-versity, 2012. – 468 p.