

УДК 553.071:553.491.8:549.27(470.54)

ПЛАТИНОИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ СВЕТЛОБОРСКОГО И ВЕРЕСОВОБОРСКОГО КЛИНОПИРОКСЕНИТ-ДУНИТОВЫХ МАССИВОВ СРЕДНЕГО УРАЛА (РОССИЯ)¹

© 2017 г. С. Ю. Степанов^{а, *}, К. Н. Малич^б, А. В. Козлов^а, И. Ю. Баданина^{б, с}, А. В. Антонов^с

^аНациональный минерально-сырьевой университет “Горный”, 199106, Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 2

^бИнститут геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН
620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15

^сВсероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
199106, Санкт-Петербург, пр. Средний, д. 74

*E-mail: Stepanov-1@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.11.2015 г.

В статье приведены новые данные по геологии и минералогии платиноидного оруденения, приуроченного к хромит-платиновым рудным зонам в дунитах Светлоборского и Вересовоборского массивов Среднего Урала. Особенности геологической позиции платиноидных рудных зон, содержания в них платины, химический состав и морфологические особенности минералов платиновой группы (МПГ) сопоставлены с аналогичными рудными зонами Нижнетагильского массива – мирового эталона зональных комплексов Платиноносного пояса Урала. Обосновывается приуроченность хромит-платиновых рудных тел к контактовым зонам между дунитами, отличающимися по зернистости. Подавляющее большинство МПГ представлены Pt–Fe-сплавами, близкими по стехиометрии к изоферроплатине (Pt₃Fe), Os–Ir-сплавами, Ru–Os- и Ir–Rh-сульфидами, а также Ir–Rh-тиошпинелями ряда купроиридсит–купорродсит–феррорродсит первичного парагенезиса. Наложенный парагенезис МПГ представлен твердыми растворами ряда тетраферроплатина (PtFe)–туламинит (PtFe_{0,5}Cu_{0,5}) и Pt–Cu-сплавами. Выявленные закономерности хромит-платиновых рудных зон свидетельствуют о высокой вероятности обнаружения платиноидного оруденения в дунитах Светлоборского и Вересовоборского массивов и могут быть использованы при постановке поисково-оценочных и геологоразведочных работ на платину.

DOI: 10.7868/S0016777017030066

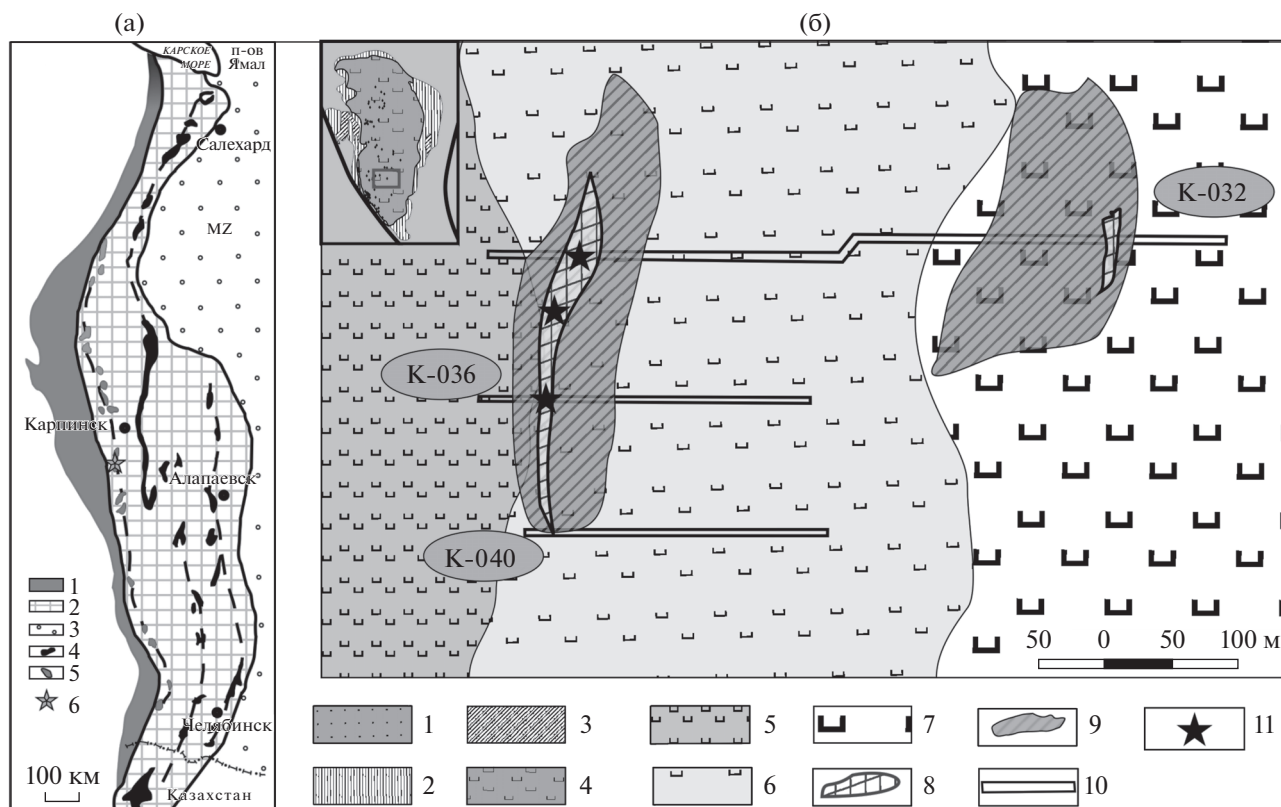
ВВЕДЕНИЕ

Урал с 1828 года стал лидером мировой добычи платины. Около 380 тонн платины было извлечено из продуктивных россыпей Нижнетагильского и Исовско-Туринского россыпных узлов (Мосин, 2002). К концу XX столетия большая часть россыпных месторождений платины на Урале была отработана. Полуторавековой опыт исследования ультраосновных комплексов, являющихся коренными источниками россыпей, позволил выделить Платиноносный пояс в пределах Уральской складчатой области. В его состав входят магматические образования, представленные дунит-клинопироксенит-габбровыми, дунит-гацбургитовыми и расслоенными интрузивами (фиг. 1а). Наиболее высоким россыпеобразующим потенциалом обладают зональные клинопироксенит-дунитовые

массивы (Высоцкий, 1913; Лазаренков и др., 1992; Золоев и др., 2001; и др.). В ходе эрозии Нижнетагильского, Светлоборского, Вересовоборского, Каменушенского и других массивов сформировалась серия россыпных узлов, включая самые крупные – Нижнетагильский и Исовско-Туринский. Значительные запасы платины в россыпях косвенно указывают на возможность выявления в породах клинопироксенит-дунитовых массивов рудных зон, представляющих интерес для промышленной отработки. Несмотря на длительную историю изучения платиноносных массивов Урала (Высоцкий, 1913; Duparc, Tikhonowitch, 1920; Заварицкий, 1928; Лазаренков и др., 1992; Генкин, 1997; Иванов, 1997; Золоев и др., 2001; Auge *et al.*, 2005; Волченко и др., 2007; Пушкарев и др., 2007; Anikina *et al.*, 2014; Tolstykh *et al.*, 2015; и др.), крупных коренных месторождений платины в них обнаружено не было.

За время изучения клинопироксенит-дунитовых массивов был выявлен ряд закономерностей

¹ Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Четвертой научной молодежной школе ИГЕМ РАН “Новое в познании процессов рудообразования”. 01–05.12.2014 г.



Фиг. 1. а – Расположение Светлоборского и Вересовоборского массивов в Платиноносном поясе Урала (Гурская, 1997). Условные обозначения: 1 – Центрально-Уральское поднятие; 2 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 3 – мезозойско-кайнозойские отложения Зауралья; 4 – альпинотипные дунит-гарцбургитовые массивы; 5 – зональные дунит-клинопироксенит-габбровые массивы Платиноносного пояса; 6 – местоположение Светлоборского и Вересовоборского массивов. б – Схема геологического строения участка Вершинный Светлоборского массива с выделенными хромит-платиновыми зонами. На врезке слева сверху Светлоборский массив. Условные обозначения: (на врезке) – 1 – базальты и андезитовые базальты и развитые по ним зеленые сланцы; 2 – пироксениты; 3 – габбро; 4 – дуниты ядра; участок Вершинный: 5 – мелкозернистые дуниты; 6 – мелко- и среднезернистые дуниты; 7 – среднезернистые дуниты; 8 – зона прожилково-вкрапленных хромитов, переходящих в массивные; 9 – зона прожилково-вкрапленных хромитов; 10 – магистральные каналы; 11 – точки хромитовых сегрегаций с видимой платиной.

и особенностей ассоциирующего с ними благороднометального оруденения. Было установлено три типа платиноидного оруденения (Бетехтин, 1935; Золоев, 2000; Naldrett, 2004; и др.): пироксенитовый, дунитовый и хромит-платиновый. Для *пироксенитового* и *дунитового* типов характерно нахождение минералов платиновой группы (МПГ) в пироксенитах и дунитах соответственно. Ряд исследователей Авроринского месторождения предполагал тесную связь дунитового типа оруденения с грубозернистыми дунитами и дунитовыми пегматитами (Бетехтин, 1935; Лазаренков и др., 1992). Однако единственный случай выявления промышленно значимых концентраций платины в дунитах без видимой пространственной связи с хромшпинелидами – это рудопроявление им. Н.К. Высоцкого в пределах Светлоборского массива (Телегин и др., 2009; Толстых и др., 2011; Козлов и др., 2011).

Хромит-платиновый тип является самым известным и наиболее изученным в связи с проведением широкомасштабных геологоразведочных и поисково-оценочных работ в пределах дунитового ядра Нижнетагильского массива во второй половине XX столетия. В ходе поисково-оценочных работ в пределах дунитовых ядер Светлоборского и Вересовоборского массивов был выявлен ряд участков, потенциально перспективных на выявление коренного платинового оруденения (Телегин и др., 2009; Толстых и др., 2011; Козлов и др., 2011). В последние три года впервые обнаружены хромит-платиновые минерализованные зоны в дунитах Светлоборского (рудопроявление Вершинное) и Вересовоборского массивов, представляющие значительный промышленный интерес.

Цель исследования заключалась в минералого-геохимической характеристике обогащенных хромшпинелидами платиноносных рудных

зон в дунитах Светлоборского и Вересовоборского массивов. Наряду с геологическими особенностями рассмотрены ключевые минералого-петрографические характеристики рудных агрегатов, особенности химического состава МПГ и последовательность их образования. Для установления общих закономерностей размещения хромит-платинового оруденения в зональных клинопироксенит-дунитовых массивах Урала выполнено сравнение рудных зон Светлоборского и Вересовоборского массивов с ранее охарактеризованными хромит-платиновыми рудными зонами Нижнетагильского массива.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Зональные массивы Урала относятся к дунит-клинопироксенит-габбровой формации (Левинсон-Лессинг, 1900; Магматические формации..., 1979). Плутонические комплексы этой формации пространственно тяготеют к западному борту Тагило-Магнитогорской мегазоны и контролируются Главным уральским разломом. Нижнетагильский массив относится к Тагильскому магматическому комплексу, Светлоборский и Вересовоборский массивы — к Качканарскому (Иванов, 1997). Их общей геологической особенностью является присутствие в центральной части дунитового ядра, которое окружено сохранившейся в различной степени клинопироксенитовой оболочкой. Площадь дунитов Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского массивов различна и составляет ~15, ~8.6 и ~25 км² соответственно.

В пределах дунитовых ядер также выявлена зональность, выражающаяся в присутствии разноминеральных дунитов. Для Нижнетагильского массива в центральной части (г. Соловьёва) установлено развитие крупнозернистых, реже грубозернистых дунитов с телами дунит-пегматитов (Иванов, 1997). Крупно- и грубозернистые дуниты окружены средне- и крупнозернистыми разновидностями. Граница между ними постепенная. Эта граница (Иванов, 1997; Пушкарёв и др., 2007; Столяров, 2002) определяет положение зон с повышенной вкрапленностью хромшпинелидов, а также прожилково-вкрапленных и массивных хромититов. Аналогичные тела грубозернистых дунитов и дунитовых пегматитов обнаружены в ядре Вересовоборского массива. Они вытянуты с севера на юг на 600 м при средней мощности 150 м. Для ядерной части Светлоборского массива не выявлено крупно- и грубозернистых разновидностей дунитов. Большая часть массива сложена средне-мелкозернистыми дунитами, среди которых выделяются отдельные участки среднезернистых дунитов.

Дуниты в различной степени серпентинизированы, вплоть до образования собственно серпентинитов. В западной части дунитового ядра Нижнета-

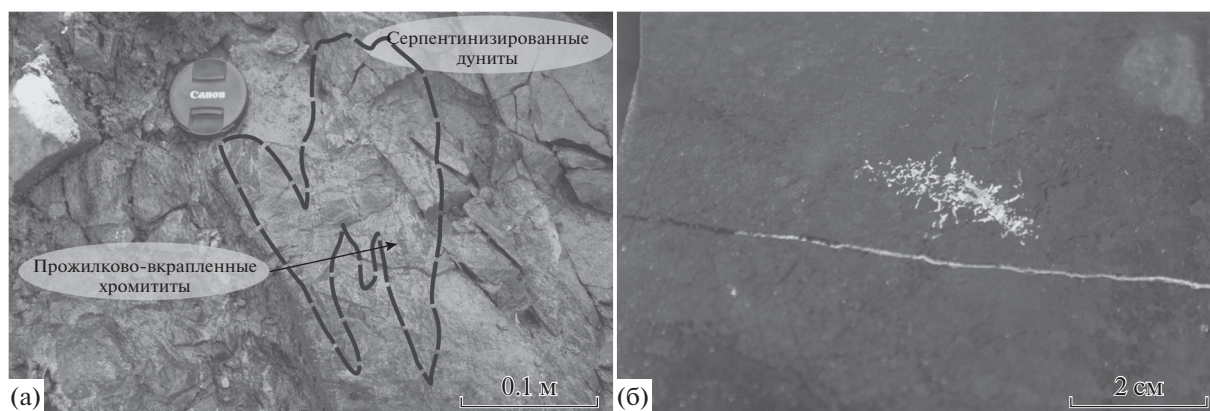
гильского массива широко развиты брусит-антигоритовые метасоматиты (Иванов, 1987); в западной части дунитового ядра Вересовоборского массива — серпентиниты с родингитами, нередко с жильными телами амфибол-гроссулярового состава.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для проведения исследований послужили образцы ультраосновных пород, отобранные в пределах Светлоборского и Вересовоборского массивов во время полевых работ 2013–2015 гг. Большая часть образцов представляла собой штупные пробы, которые были взяты из коренных обнажений и магистральных канав, пройденных ЗАО “Урал-МПГ” для заверки литохимических хром-платиновых аномалий. Наряду с данными пробами были изучены образцы керна из разведочных скважин, пробуренных в рамках поисково-оценочных работ ЗАО “Урал-МПГ”.

Образцы изучались с использованием петрографических и минераграфических методов по стандартным методикам. Дуниты по размеру зерен оливина были разделены на мелкозернистые (менее 1 мм), среднезернистые (1–5 мм) и крупнозернистые (более 5 мм). Для более широкого охвата минералы платиновой группы выделялись из протолок хромититов и хромшпинелидовых сегрегаций. Извлечение МПГ из протолок и шлихов проводилось методом “отдувки”. Для оценки содержания платины в хромитовых сегрегациях отбирались задириковые пробы хромититов (весом 60–80 кг) с последующим их дроблением в щековой дробилке до фракции менее 1 мм, а затем проводилось обогащение пробы на гравитационном концентраторе до получения черного рудного концентрата. Из этого концентрата платиновые минералы извлекались методом “отдувки” с последующим их взвешиванием (для проб с содержанием Pt более 10 г/т). Для проб с более низкими содержаниями платины (до 10 г/т) проводился подсчет знаков под биноклем с вычислением их общей массы по объему. Пересчет на содержание платины в хромититах проводился с расчетом преобладания среди МПГ минерала, по стехиометрии близкого к изоферроплатине.

Исследование морфологических особенностей минеральных индивидов осуществлялось с использованием сканирующей электронной микроскопии: JEOL-JSM6390LV (ИГГ УрО РАН, Екатеринбург); CamScan MX2500 (ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) и Tescan VEGA (Горный университет, Санкт-Петербург). Химический состав минералов платиновой группы охарактеризован с помощью метода рентгеноспектрального микроанализа (микроанализатор CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами, ИГГ УрО РАН, Екатеринбург). При проведении количественных анализов были использованы следующие рентге-



Фиг. 2. Платиноносные хромититы: а – прожилково-вкрапленные хромититы (оконтурены линией черного цвета) в серпентинизированном дуните участка Вершинный Светлоборского массива; б – зернистый агрегат минералов платиновой группы (светлое) в хромитите (темное) Вересовоборского массива.

новские спектральные линии и стандартные образцы: $OsM\alpha$, $IrL\alpha$, $RuL\alpha$, $RhL\alpha$, $PtL\alpha$, $PdL\beta$, $NiK\alpha$ (все чистые металлы), $FeK\alpha$, $CuK\alpha$, $SK\alpha$ (халькопирит); проведен учет спектральных наложений линий ($RuL\beta$ на $RhL\alpha$; $IrL\alpha$ на $CuK\alpha$ и др.). Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, сила тока пучка электронов – 20 нА, длительность измерения интенсивности на пике – 10 с, на фоне – по 5 с, диаметр точки анализа – 2 мкм. Всего выполнено около 250 анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

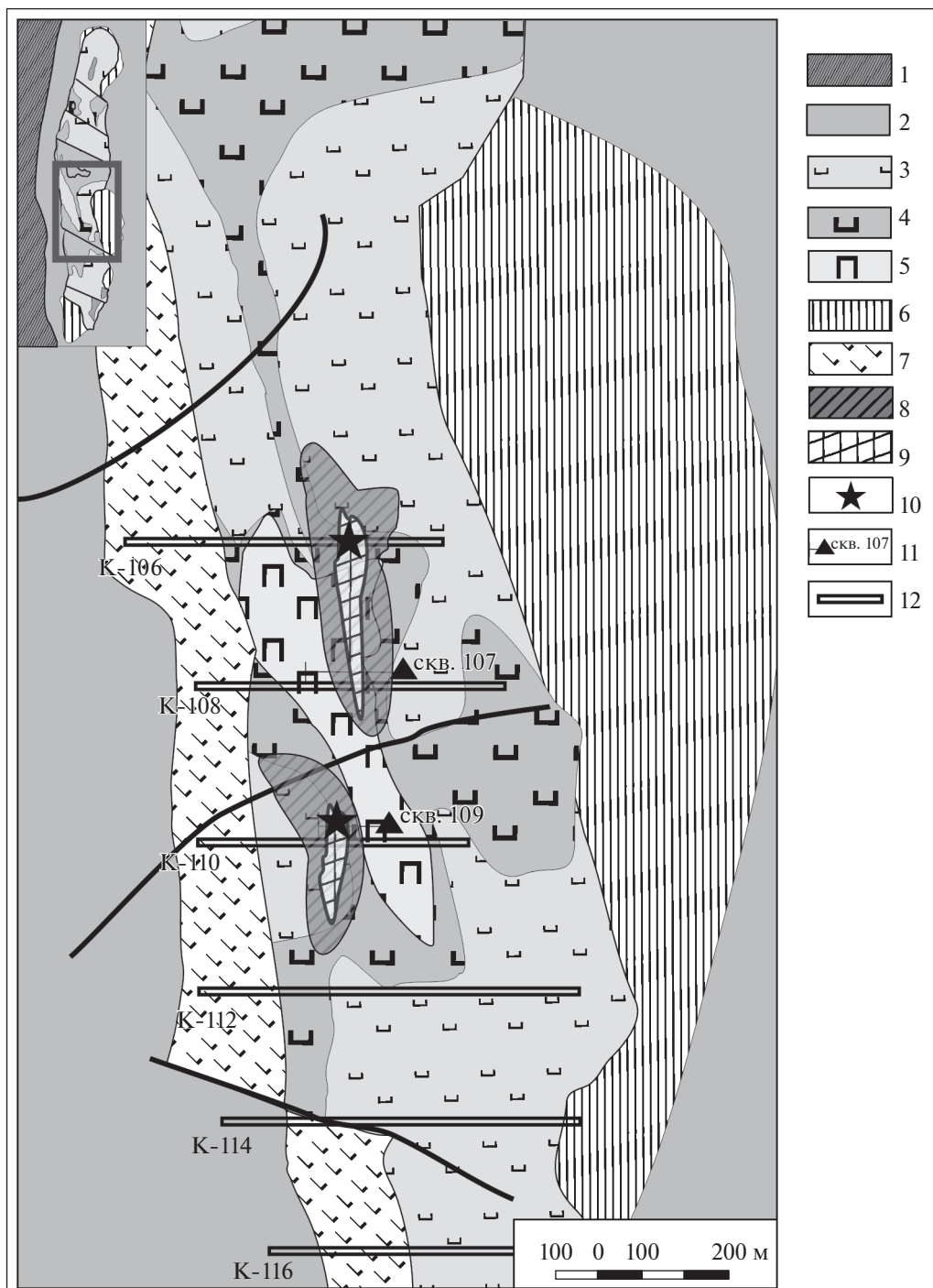
Геологическая характеристика хромит-платиновых рудных зон Светлоборского и Вересовоборского массивов

Рудопоявление “Вершинное” расположено в южной части Светлоборского массива (фиг. 1). По данным геологической документации канав и керн скважин, заверенных петрографическими исследованиями, в пределах разведочного участка наблюдается постепенный переход от среднезернистых дунитов к мелкозернистым. Среднезернистые дуниты характеризуются порфировидной гипидиоморфнозернистой структурой. Крупные идиоморфные вкрапленники оливина размером до 1.5 см окружены среднезернистой массой субидиоморфных индивидов оливина. Среднезернистые порфировидные дуниты сменяются равномернозернистыми разновидностями мелко- и среднезернистых дунитов, которые переходят в мелкозернистые порфировидные дуниты. Зона с повышенной вкрапленностью хромшпинелида, прожилково-вкрапленными сегрегациями и массивными жильными телами хромитов располагается на границе мелко-среднезернистых дунитов с мелкозернистыми порфировидными. Эта зона вытянута в меридиональном направлении и прослежена на

800 метров в длину при мощности в среднем 50–70 м (фиг. 16). В ее пределах наблюдаются неравномерно распределенные участки дунитов с повышенным содержанием хромшпинелида до 10–15%. Среди обогащенных хромитом дунитов залегают небольшие субизометричные шлировые выделения хромшпинелидов и линзовидные тела хромитов со средним размером отдельных линз около 0.4–0.7 м по удлинению и 2–5 см в поперечнике. Контакт линзовидных тел с вмещающими породами постепенный, с уменьшением содержания хромшпинелида в дуните по мере удаления от контакта (фиг. 2а). Средние содержания весовой платины по данным задиркового опробования шлировых обособлений хромшпинелидов составили 2–5 г/т, в линзовидных телах хромитов – 10–15 г/т (максимальное 40–50 г/т).

По результатам описания керн и документации канав в пределах Вересовоборского массива среди среднезернистых дунитов выделен участок грубозернистых дунитов с телами дунитовых пегматитов (фиг. 3). Этот участок простирается с севера на юг на 750 м при средней мощности 80–90 м. Грубозернистые дуниты часто имеют порфировидную структуру. Порфировые вкрапленники оливина достигают 5–7 см. В грубозернистых порфировидных дунитах задокументированы жильные тела дунит-пегматитов. На границе грубозернистых и среднезернистых дунитов установлены зоны, обогащенные хромшпинелидом, с участками прожилково-вкрапленных и массивных хромитов (фиг. 2б), характеризующихся повышенными содержаниями платины (до 500 г/т).

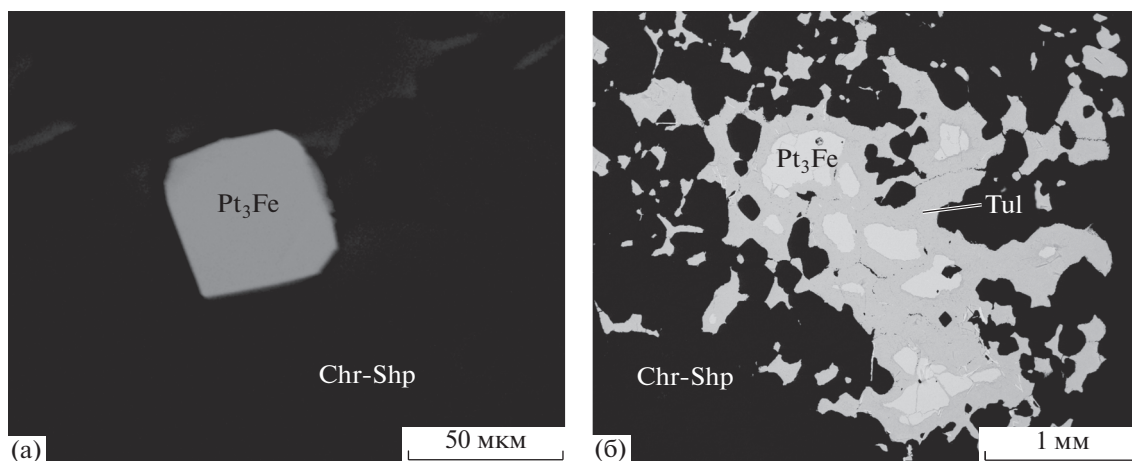
В ходе детального изучения геологического строения разведочного участка выделены две хромит-платиновые рудные зоны, которые вытянуты вдоль западного и восточного контактов поля грубозернистых дунитов (фиг. 3). По простирацию зоны прослежены на 300–350 м и по



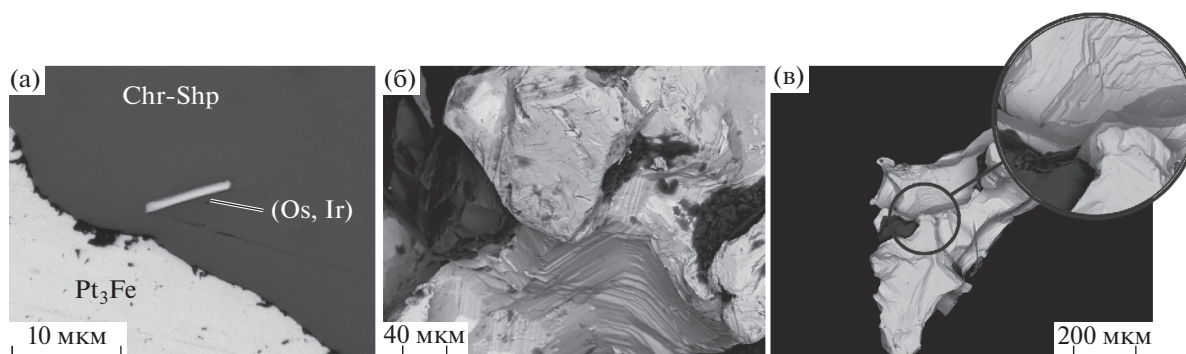
Фиг. 3. Схема геологического строения участка Вересовоборский с выделенными хромит-платиновыми зонами (с использованием данных О.К. Иванова, 1997). Условные обозначения: 1 – апотуфовые зеленые сланцы; 2 – базальты; андезитовые базальты и развитые по ним зеленые сланцы; 3 – дуниты мелко- и среднезернистые; 4 – дуниты крупнозернистые; 5 – грубозернистые дуниты с дунитовыми пегматитами; 6 – клинопироксениты; 7 – антигоритовые аподунитовые метасоматиты; 8 – зоны прожилково-вкрапленных хромититов; 9 – зона массивных жильных хромититов; 10 – точки обнаружения коренной платины, 11 – скважины колонкового бурения; 12 – разведочные канавы.

мощности не превышают 100–120 м. В дунитах рудной зоны отмечается повышенное содержание хромшпинелида. В пределах зон выделены участки с преобладанием прожилково-вкраплен-

ных обособлений хромититов и участки, в которых прожилково-вкрапленные хромититы ассоциируют с жильными массивными хромититами, слагающими небольшие линзы. Содержание пла-



Фиг. 4. Морфологические особенности минералов платиновой группы в хромититах Светлоборского (а) и Вересовоборского (б) массивов. Изображения в обратно-рассеянных электронах (сканирующий электронный микроскоп CamScan MX2500). Pt_3Fe – Pt–Fe-сплав, по составу близкий изоферроплатине, Tul – туламинит, Cr-Shp – хромшпинелид.



Фиг. 5. Особенности внутреннего строения (а) и индукционной штриховки МПГ с хромшпинелидами (б, в) из хромититов Светлоборского (а, б) и Вересовоборского (в) массивов. Pt_3Fe – Pt–Fe-сплав, по составу близкий изоферроплатине, (Os, Ir) – Ir-содержащий осмий, Cr-Shp – хромшпинелид. Изображения в отраженном свете (а, полированный шлиф) и обратно-рассеянных электронах (б, в, сканирующий электронный микроскоп CamScan MX2500).

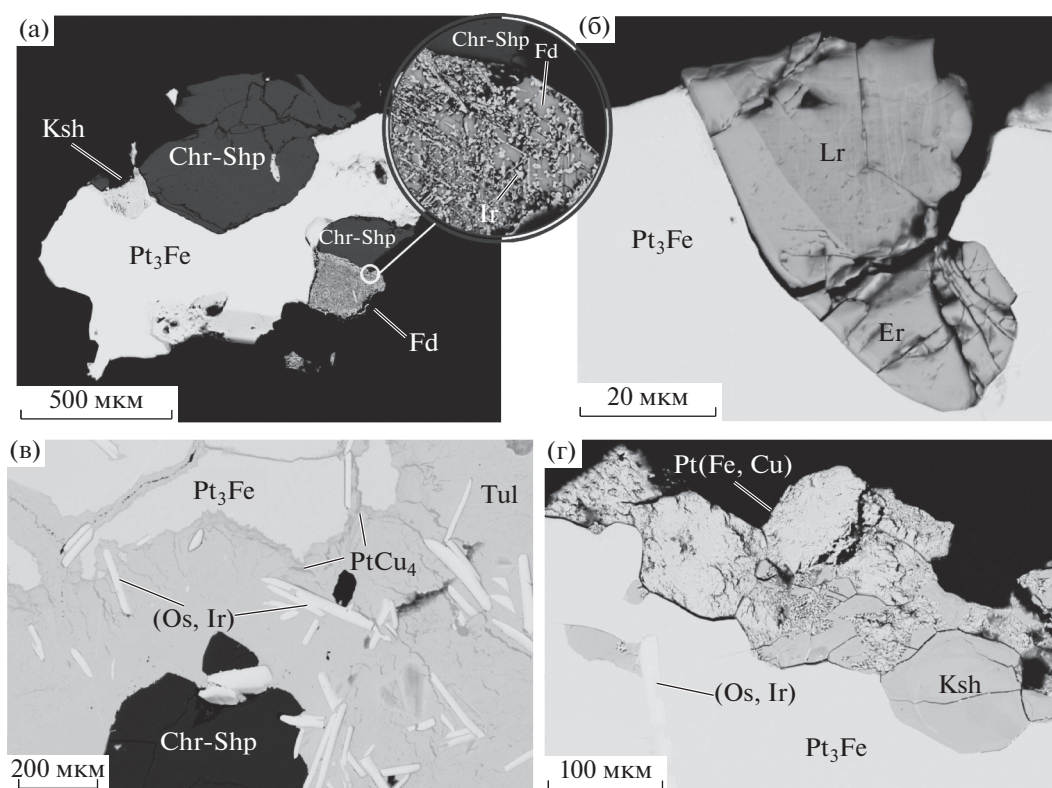
тины значительно варьирует как в пределах рудной зоны, так и в отдельных хромитовых сегрегациях. В прожилково-вкрапленных хромититах содержание платины может достигать 20–30 г/т с относительно равномерным распределением при среднем размере зерен железо-платиновых минералов 0,2–0,5 мм. В массивных жильных хромититах МПГ распределены крайне неравномерно с выделением особо крупных зерен массой до 40 г. Содержание платины в таких хромитовых сегрегациях может достигать 500 г/т.

Минералы платиновой группы

Подавляющее большинство МПГ хромититов изученных клинопироксенит-дунитовых массивов представлено Pt–Fe сплавами, которые преобладают над другими МПГ. Pt–Fe сплавы встречаются как в виде отдельных индивидов – хорошо ограненных кубических кристаллов размером до

0,2 мм (фиг. 4а), так и зернистых агрегатов, “цементирующих” отдельные зерна хромшпинелида (фиг. 4б). Индивиды железо-платиновых минералов образуют с хромшпинелидами поверхности совместного роста с индукционной штриховкой (фиг. 5). Агрегаты МПГ в хромититах Светлоборского массива не превосходят 0,5–1,0 мм. В хромититах Вересовоборского массива обособления МПГ часто достигают первых сантиметров, что типично для агрегатов железо-платиновых минералов ряда месторождений и рудопроявлений Нижнетагильского массива (Господская шахта, Крутой лог, Сырков лог и др.).

Для Светлоборского массива характерно преобладание изотропных железо-платиновых минералов с однородным внутренним строением и идиоморфными включениями Ru–Os- и Ir–Rh-сульфидов, Rh–Ir-тиошпинелей и Os–Ir-сплавов (фиг. 5а, 6а–г). Для полиминеральных ассоциа-



Фиг. 6. Особенности строения индивидов и агрегатов минералов платиновой группы из хромититов Светлоборского (а, б, г) и Вересовоборского (в) массивов. Изображения в обратно-рассеянных электронах (сканирующий электронный микроскоп CamScan MX2500). Pt₃Fe – Pt–Fe-сплав, близкий по стехиометрии изоферроплатине Pt₃Fe, Ksh – кашинит, Fd – минерал ряда феррододсит–купородсит, Lr – лаурит, Er – эрликманит, Tul – туламинит, (Os, Ir) – Ir-содержащий осмий, PtCu₄ – Pt–Cu-сплав, Chr-Shp – хромшпинелид, Pt(Fe, Cu) – медь-содержащая тетраферроплатина.

ций платиноидов из хромититов Вересовоборского массива устанавливается зональное строение. В центральной части сохраняются изотропные зерна реликтовых железо-платиновых минералов, которые в краевой части сменяются анизотропной каймой, сложенной минералами ряда туламинит-тетраферроплатина (фиг. 4б, 6в). Для Pt–Fe минералов Светлоборского и Вересовоборского массивов типичны идиоморфные включения Os–Ir сплавов (фиг. 6в, г).

Согласно классификации Л. Кабри и К. Фезера (Cabri, Feather, 1975), в системе Pt–Fe известны четыре минерала: самородная платина с разупорядоченной гранецентрированной кубической структурой (*fcc*, пространственная группа *Fm3m*) и содержанием платины >80 ат. %; железистая платина с разупорядоченной гранецентрированной кубической структурой (*fcc*, пространственная группа *Fm3m*) и содержанием Fe 20–50 ат. %; изоферроплатина с упорядоченной примитивной кубической структурой (*psc*, пространственная группа *Pm3m*) и содержанием Fe 25–35 ат. %; и тетраферроплатина с тетрагональной структурой (пространственная группа *P4/mmm*) и содержа-

нием железа примерно 45–55 ат. %, что соответствует PtFe. Так как при отсутствии рентгеноструктурных данных Pt–Fe твердые растворы, близкие по составу Pt₃Fe, могут быть как железистой платиной, так и изоферроплатиной, мы далее используем для данных минералов термин “Pt–Fe сплав”.

Химический состав Pt–Fe сплавов Светлоборского и Вересовоборского массивов близок к стехиометрии Pt₃Fe (где Pt равна сумме ат. % ЭПГ; Fe равно сумме ат. % железа, меди и никеля), а также соответствует туламиниту (PtFe_{0,5}Cu_{0,5}) и тетраферроплатине (PtFe) (табл. 1, ан. 1–4; табл. 2, ан. 1–4; фиг. 7а, б). Также установлен Pt–Cu сплав, по составу близкий к PtCu₄ (табл. 2, ан. 5).

По химическому составу Pt–Fe сплавы Светлоборского и Вересовоборского массивов (фиг. 7а, б) отличаются от Pt–Fe минералов Нижнетагильского массива, которые близки к стехиометрии Pt₂Fe (фиг. 7в, табл. 2, ан. 9, 10), а также к промежуточным членам ряда тетраферроплатина–туламинит (PtFe–PtFe_{0,5}Cu_{0,5}) (фиг. 7в, табл. 2, ан. 11) и тетраферроплатина–ферроникельплатина (Pt–Fe–PtFe_{0,5}Ni_{0,5}) (Малич и др., 2015).

Таблица 1. Типичные химические составы минералов платиновой группы из хромититов Светлоборского массива

Анализ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Минерал	Pt ₃ Fe	Pt ₃ Fe	Tfp	Tul	Ksh	Ksh	B	Lr	Er	(Os,Ir)	Rh-Tsp	Rh-Tsp
Мас. %												
Fe	8.76	8.37	20.27	10.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.50	7.04
Ni	0.00	0.11	2.52	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	0.62	0.54	1.43	12.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.86	7.17
Ru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.91	17.98	2.86	0.00	0.00
Rh	0.82	0.66	0.37	0.37	13.66	23.86	31.20	1.73	1.30	0.20	35.86	41.68
Pd	0.71	0.00	0.28	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Os	0.22	0.24	0.18	0.20	0.00	0.00	0.00	30.32	44.85	84.07	0.00	0.00
Ir	1.14	2.49	0.00	0.31	63.98	50.10	41.80	5.69	4.97	10.65	15.92	8.27
Pt	87.67	87.51	74.24	73.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.54	4.39	3.84
S	0.00	0.00	0.00	0.00	22.77	24.95	26.70	32.25	30.04	0.00	28.85	31.25
Сумма	99.94	99.92	99.29	98.15	100.41	98.91	99.70	98.90	99.14	99.32	99.38	99.25
Ат. %												
Fe	24.60	23.81	44.47	24.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.41	7.50
Ni	0.00	0.30	5.26	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cu	1.53	1.34	2.76	25.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.77	6.71
Ru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.10	12.81	5.28	0.00	0.00
Rh	1.25	1.02	0.44	0.46	11.29	18.25	22.40	1.12	0.91	0.36	21.83	24.09
Pd	1.04	0.00	0.32	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Os	0.18	0.20	0.12	0.13	0.00	0.00	0.00	10.64	16.97	82.54	0.00	0.00
Ir	0.93	2.06	0.00	0.21	28.31	20.51	16.07	1.98	1.86	10.35	5.19	2.56
Pt	70.47	71.27	46.63	48.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	1.41	1.17
S	0.00	0.00	0.00	0.00	60.40	61.24	61.53	67.16	67.45	0.00	56.39	57.97

Примечание. Pt₃Fe – Pt–Fe–сплав, близкий по стехиометрии к изоферроплатине, Tfp – тетраферроплатина, Tul – туламинит, Ksh – кашинит, B – боуит, Lr – лаурит, Er – эрликманит, (Os,Ir) – иридий-содержащий осмий, Rh-Tsp – минерал изоморфного ряда феррородсит–купородсит.

В Pt–Fe сплавах Светлоборского и Вересовоборского массивов диагностирован набор разнообразных включений, представленных Ru–Os сульфидами ряда лаурит–эрликманит (фиг. 8а; табл. 1, ан. 8, 9), Ir–Rh сульфидами ряда кашинит–боуит (Ir₂S₃–Rh₂S₃) (фиг. 8б, табл. 1, ан. 5–7), Ir–Rh–Pt тиошпинелями ряда купроиридсит–купородсит–феррородсит (CuIr₂S₄–CuRh₂S₄–FeRh₂S₄) (табл. 1, ан. 11, 12; табл. 2, ан. 8) и Os–Ir(–Ru) сплавами (фиг. 8в; табл. 1, ан. 10; табл. 2, ан. 6, 7). Для минералов ряда лаурит–эрликманит и кашинит–боуит характерно зональное строение (фиг. 6б) и увеличение от центра к периферии содержания эрликманитового и боуитового минералов соответственно (фиг. 8а, б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

За более чем вековую историю детального изучения коренной платиноносности клинопироксенит–дунитовых комплексов были выдвинуты различные гипотезы о формировании платинового оруденения. Наиболее традиционным является представление о связи платинового оруденения с хромшпинелидовыми обособлениями (Заварицкий, 1928; Бетехтин, 1935; Лазаренков и др., 1992; Генкин, 1997; Иванов, 1997). Недавно появились предпосылки к обнаружению коренных платиновых рудных зон в дунитах, где платиновая минерализация не имеет видимой связи с хромшпинелидами (Козлов, 2007; Телегин и др., 2009; Толстых и др., 2011).

Таблица 2. Типичные химические составы МПГ из хромититов Вересовоборского и Нижнетагильского массивов

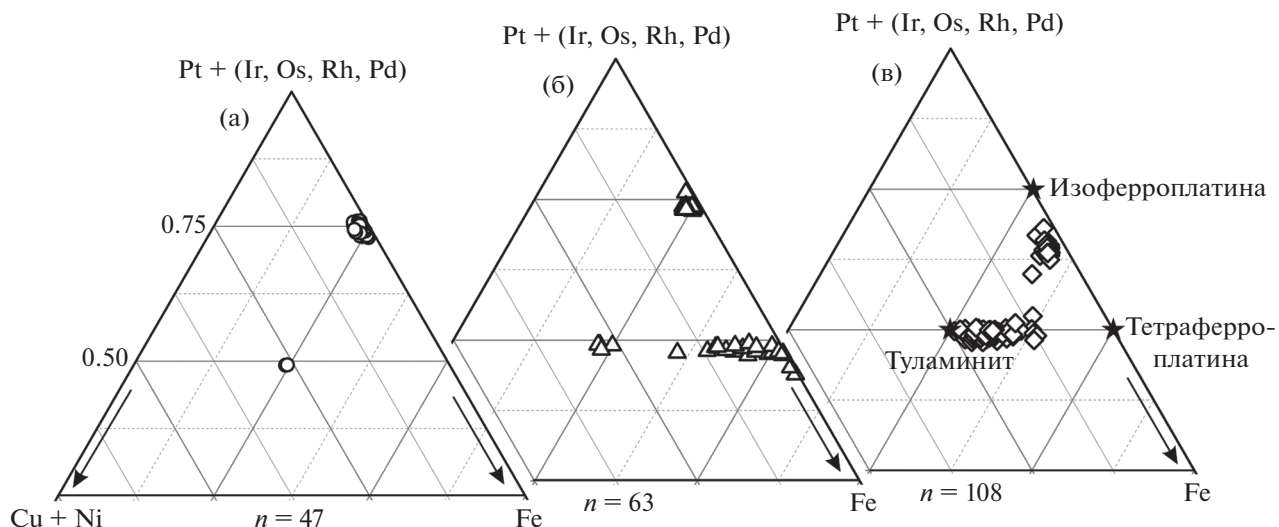
Анализ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
минерал	Pt ₃ Fe	Pt ₃ Fe	Tfp	Tul	Pt–Cu	(Os, Ir)	(Ir, Os)	Ir–Tsp	Pt ₂ Fe	Pt ₂ Fe	Pt(Fe, Cu)	Lr	(Os, Ir)	(Ir, Os)
Мас. %														
Fe	8.66	8.85	22.44	11.12	0.00	0.00	0.32	1.74	12.01	12.44	14.35	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.20	0.09	0.00	0.00	0.12	0.10	0.62	0.41	0.32	0.00	0.00	0.00
Cu	0.59	0.40	0.57	13.08	57.31	0.00	0.00	10.55	0.32	0.45	7.90	0.00	0.00	0.00
Ru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	55.64	7.91	3.51
Rh	0.55	0.71	0.32	0.46	0.00	0.40	1.13	14.92	0.73	0.96	0.69	0.00	0.00	3.53
Pd	0.00	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Os	0.23	0.18	0.26	0.23	0.00	73.19	30.70	0.00	0.00	0.00	0.00	4.87	61.08	14.96
Ir	1.00	0.20	0.00	0.00	0.00	22.13	57.18	35.73	4.20	3.41	3.17	2.25	30.92	74.91
Pt	88.78	89.48	76.63	74.58	41.35	3.23	9.99	9.84	82.62	81.67	72.69	0.00	0.00	2.29
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.09	0.00	0.00	0.00	37.15	0.00	0.00
Сумма	99.81	99.82	100.42	99.92	98.66	99.22	99.80	99.97	100.50	99.34	99.12	99.91	99.91	99.20
Ат. %														
Fe	24.57	25.06	49.52	24.96	0.00	0.00	1.08	2.19	31.48	32.64	32.84	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.42	0.19	0.00	0.00	0.38	0.12	1.55	1.02	0.70	0.00	0.00	0.00
Cu	1.47	0.99	1.10	25.80	80.97	0.00	0.00	11.65	0.73	1.03	15.88	0.00	0.00	0.00
Ru	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00	31.52	13.97	6.32
Rh	0.85	1.09	0.38	0.56	0.00	0.75	2.07	10.17	1.04	1.37	0.86	0.00	0.00	6.25
Pd	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Os	0.19	0.15	0.17	0.15	0.00	73.56	30.31	0.00	0.00	0.00	0.00	1.47	57.32	14.32
Ir	0.82	0.17	0.00	0.00	0.00	22.01	55.87	13.04	3.20	2.60	2.11	0.67	28.71	70.97
Pt	72.10	72.54	48.41	47.92	19.03	3.17	9.62	3.54	62.00	61.34	47.61	0.00	0.00	2.14
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.29	0.00	0.00	0.00	66.34	0.00	0.00

Примечание. Вересовоборский массив (ан. 1–8), Нижнетагильский массив (ан. 9–14). Pt₃Fe – Pt–Fe сплав, близкий по стехиометрии к изоферроплатине, Tfp – тетраферроплатина, Tul – туламинит, Pt–Cu – неназванный медно-платиновый минерал состава PtCu₄, (Os, Ir) – иридий-содержащий осмий, (Ir, Os) – осмий-содержащий иридий, Ir–Tsp – минерал изоморфного ряда купроиридсит–купорродсит, Pt₂Fe – Pt–Fe сплав, близкий по стехиометрии к железистой платине, Pt(Fe, Cu) – медь-содержащая тетраферроплатина, Lr – лаурит.

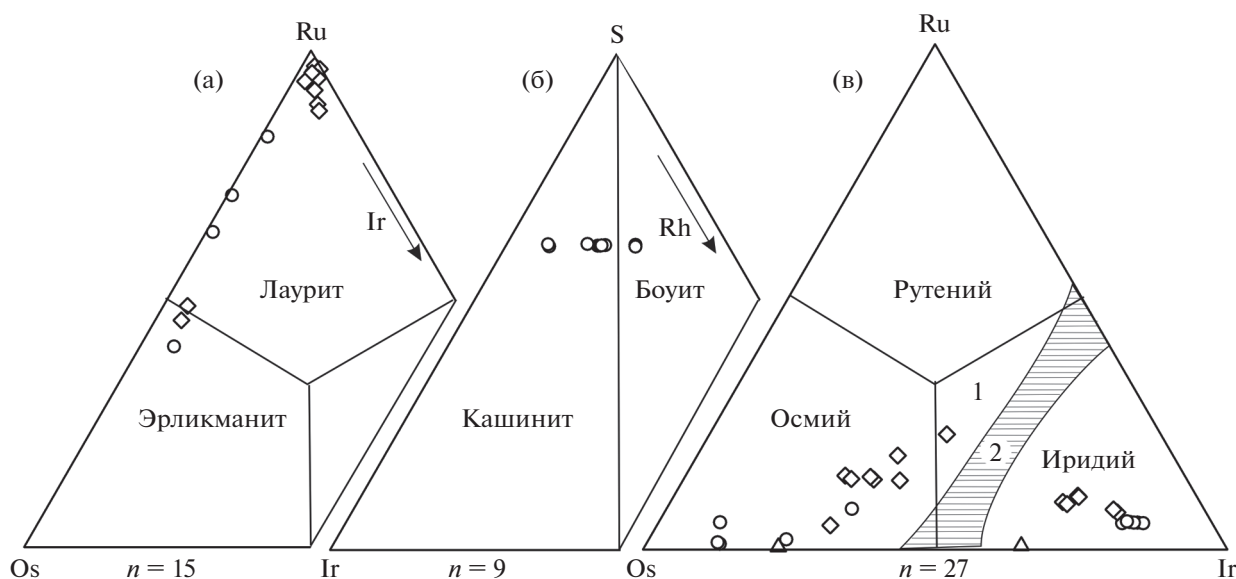
Для большинства исследований, направленных на изучение хромит-платинового оруденения, основой являлись породы и руды Нижнетагильского массива. Для хромит-платинового оруденения Нижнетагильского массива был выявлен геологический контроль – приуроченность к границе дунитов, различных по зернистости (Иванов, 1997; Столяров, 2002; Пушкарев и др., 2007). Обогащенная хромшпинелидами зона в дунитах, представленная хромитовыми дунитами, хромшпинелидовыми сегрегациями и хромититами, имеет в плане полукольцевую форму и подчеркивает границу между крупно-, грубозернистыми и мелко-, среднезернистыми дунитами. Характерно, что значительные концентрации платины отмечаются только в зонах, обогащенных хромшпинелидом. Для хромшпинелидовых сегрегаций и хромитов установлен целый ряд структур и текстур, среди которых преобладают прожилково-вкрапленные,

брекчиевидные и др. (Заварицкий 1928; Иванов, 1997; и др.).

Выявленные хромит-платиновые зоны в дунитовых ядрах Светлоборского и Вересовоборского массивов (фиг. 1–3) тяготеют к контактам среднезернистых разновидностей дунитов с мелкозернистыми (для Светлоборского массива) и крупно-, грубозернистыми дунитов, содержащих тела дунитовых пегматитов, со среднезернистыми дунитами (для Вересовоборского массива). Положение хромит-платиновой рудной зоны Вересовоборского массива аналогично позиции рудной зоны Нижнетагильского массива, приуроченной к контакту грубозернистых дунитов (слагающих г. Соловьёва), с вмещающими мелко- и среднезернистыми дунитами. Отличительной особенностью хромит-платиновых рудных зон Светлоборского массива является относительно мелкий размер индивидов МПГ и их агрегатов (до 1.5–2 мм), в отличие от



Фиг. 7. Химические составы Pt–Fe-сплавов хромититов: Светоборского (а), Вересовоборского (б) и Нижнетагильского (в) массивов в координатах Pt + (Ir,Os,Rh,Pd)–Cu+Ni–Fe, ат. %. Звездочки – минералы системы Pt–Fe: изоферроплатина, тетраферроплатина и туламинит.

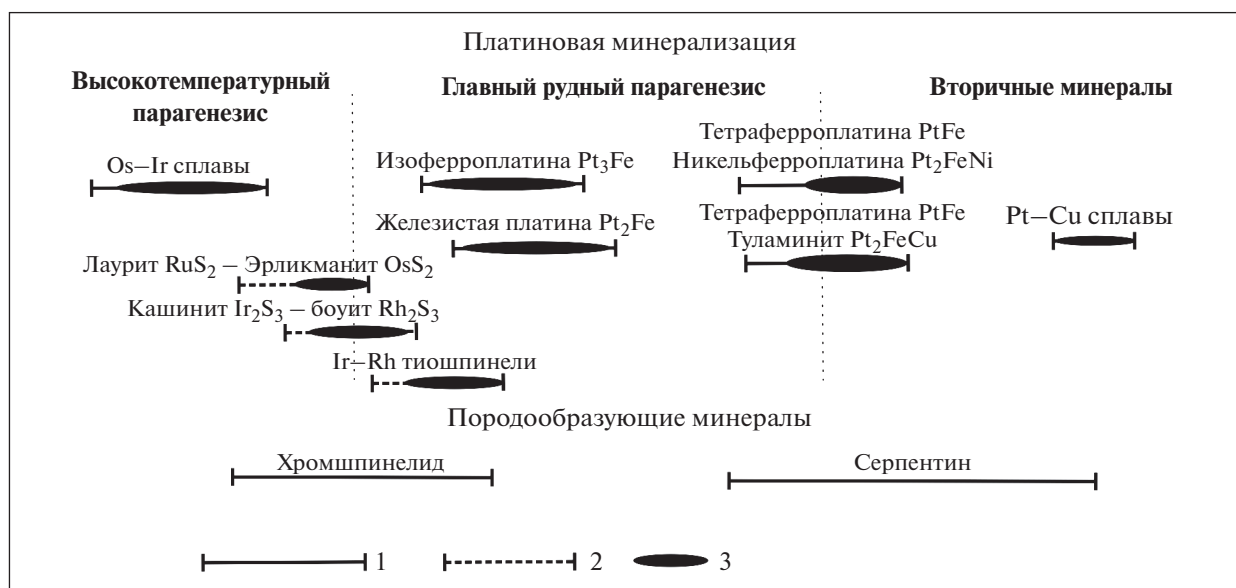


Фиг. 8. Химические составы: а – Ru–Os сульфидов в координатах Ru–Os–Ir, ат. %; б – Ir–Rh сульфидов в координатах S–Ir–Rh, ат. % и в – Os–Ir–(Ru)-сплавов в координатах Ru–Os–Ir, ат. % из хромититов Светоборского (круги), Вересовоборского (треугольники) и Нижнетагильского (ромбы) массивов. На фиг. 8в: 1 – рутениридосмин и 2 – область несмесимости по (Harris, Cabri, 1991).

Нижнетагильского и Вересовоборского массивов, где агрегаты МПГ могут достигать более значимых размеров (до первых сантиметров).

При оценке пространственно-временных и генетических взаимоотношений Pt–Fe минералов хромит-платиновых рудных зон нами установлен различный характер их взаимоотношений с хромшпинелидами. Pt–Fe минералы обнаружены в виде идиоморфных кристаллов в хромшпинелидовых сегрегациях (фиг. 4а) и в виде зернистых

масс, цементирующих зерна хромшпинелидов (фиг. 4б). Трактовка подобных взаимоотношений минералов может быть различна. Ксеноморфные зернистые агрегаты МПГ, цементирующие хромшпинелиды, позволяют предполагать значительный временной разрыв между кристаллизацией хромшпинелидов и Pt–Fe сплавов. Однако при изучении индивидов Pt–Fe минералов были установлены индукционные поверхности, сформированные в ходе совместной кристаллизации



Фиг. 9. Последовательность образования минералов платиновой группы хромит-платинового оруденения клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала по (Степанов, 2015) с дополнениями. Условные обозначения: 1 – интервал образования минерала; 2 – предполагаемый интервал образования минерала; 3 – интервал минералообразования, в который формируется большая часть минеральных индивидов.

наиболее поздних зон роста индивидов МПГ с хромшпинелидами (фиг. 5а–в). Неоднократно диагностированные поверхности совместного роста Pt–Fe минералов с хромшпинелидами (фиг. 5) указывают на одновременность их формирования.

Среди первичных Pt–Fe сплавов Светлоборского и Вересовоборского массивов характерно преобладание минерала со стехиометрией близкой к Pt_3Fe (фиг. 7а–б), в то время как для Нижнетагильского массива типоморфным является железо-платиновый минерал со стехиометрией близкой к Pt_2Fe (фиг. 7в; Auge *et al.*, 2005; Малич, Баданина, 2015; Малич и др., 2015). Минерал такого состава не известен в синтетической системе Pt–Fe (Massalski, 1993), однако природные Pt–Fe твердые растворы с химическим составом, близким к Pt_2Fe , характерны для зональных клинопироксенит-дунитовых массивов, офиолитовых дунит-гарцбургитовых массивов и дифференцированных ультрамафит-мафитовых интрузивов (Служеникин, 2000; Cabri *et al.*, 1996; Malitch, Thalhhammer, 2002; Weiser, Bachman, 1999; Малич, Когарко, 2011; и др.) и по химическому составу соответствуют железистой платине.

Для Вересовоборского и Нижнетагильского массивов характерно значительное развитие минералов ряда тетраферроплатина-туламинит, замещающих первичные Pt–Fe сплавы (фиг. 7б, в). При этом минералы ряда тетраферроплатина-никельферроплатина, типичные для Нижнетагильского массива (Малич и др., 2015), не были обна-

ружены в хромит-платиновых рудных зонах Светлоборского и Вересовоборского массивов. Характерной отличительной особенностью Светлоборского массива является широкое развитие промежуточных разновидностей сульфидов ряда лаурит–эрликманит (RuS_2-OsS_2), кашинит–боуит ($Ir_2S_3-Rh_2S_3$) и Ir–Rh тиошпинелей ряда купроиридсит–купрородсит–феррородсит ($CuIr_2S_4-CuRh_2S_4-FeRh_2S_4$). По данным Н.Д. Толстых и др. (2011), кашинит часто замещается агрегатом гексаферрума.

Последовательность образования платиноидной минерализации хромит-платинового оруденения клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала приведена на фиг. 9. Наличие включений Os–Ir сплавов, Ru–Os и Ir–Rh сульфидов в Pt–Fe сплавах Светлоборского и Вересовоборского массивов, а также соотношения фаз равновесия Os-содержащих сплавов, основанные на бинарной системе Os–Ir (Massalski, 1993), свидетельствуют об их высокой температуре образования. Для Pt–Fe сплавов устанавливаются два главных этапа. Первый характеризуется образованием Pt–Fe сплавов, близких по составу к изоферроплатине и железистой платине, в результате совместной кристаллизации с хромшпинелидами. Второй этап связан с замещением первичных Pt–Fe сплавов минералами группы тетраферроплатина–туламинит–никельферроплатина и Pt–Cu сплавами в процессе серпентинизации ультрамафитов.

Многочисленные аспекты формирования клинопироксенит-дунитовых массивов и созданные на их основе прогнозно-поисковые модели платиноидного оруденения остаются дискуссионными (Иванов, 1997; Малич, 1999; Золоев и др., 2001; Johan, 2002; Округин, 2004, 2011; Попов, 2005; Auge *et al.*, 2005; Волченко и др., 2007; Пушкарев и др., 2007; Burg *et al.*, 2009; Ефимов, 2010; Мочалов, 2013; Ферштатер, 2013; Anikina *et al.*, 2014; Guillou-Frottier *et al.*, 2014; Tolstykh *et al.*, 2015; и др.). В результате выполненных исследований установлена одновременность формирования Pt–Fe сплавов с хромшпинелидами. Высокую практическую значимость имеет установление геологического контроля оруденения. Использование выявленных закономерностей позволит более эффективно на стадии поисков оконтуривать зоны, обогащенные хромшпинелидами, и в их пределах проводить крупнообъемное опробование для получения достоверных данных о содержании платины в рудных телах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые охарактеризованы геологические и минералогические особенности платиноидного оруденения в пределах хромит-платиновых рудных зон Светлоборского и Вересовоборского зональных клинопироксенит-дунитовых массивов. Обоснована приуроченность хромит-платиновых рудных тел к границам между различными по зернистости дунитами. Отмечены крайне различные уровни концентраций платины в рудных зонах и вмещающих дунитах. В хромит-платиновых рудных зонах платиноидная минерализация представляет рассеянную вкрапленность крупных зерен МПГ и их агрегатов. Установлено, что большинство МПГ в хромититах Светлоборского и Вересовоборского массивов представлено Pt–Fe сплавами, среди которых доминируют минералы, близкие по составу к изоферроплатине (Pt_3Fe), подчиненные им Ru–Os сульфиды и Os–Ir сплавы. Наложенный низкотемпературный парагенезис МПГ образован твердыми растворами ряда тетраферроплатина–туламинит ($PtFe-PtFe_{0.5}Cu_{0.5}$). Характерной особенностью Светлоборского массива является широкое развитие промежуточных разновидностей Ru–Os сульфидов ряда лаурит–эрликманит и Ir–Rh сульфидов ряда кашинит–боуит.

Открытие в дунитах хромит-платиновых рудных зон предопределяет возможность выявления коренных месторождений в пределах Светлоборского и Вересовоборского массивов. Высокую практическую значимость имеет установление геологического контроля платиноидного оруденения, позволяющего значительно сократить затраты на поисково-оценочные и геологораз-

дочные работы на платину в пределах зональных клинопироксенит-дунитовых массивов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны С.П. Главатских, Ю.Л. Крецеру и В.В. Хиллер за содействие при проведении аналитических исследований. Мы благодарны Н.Д. Толстых и анонимному рецензенту за замечания, способствовавшие улучшению рукописи. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-05-00967-а) и УрО РАН (проект 15-18-5-34).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бетехтин А.Г.* Платина и другие минералы платиновой группы. М.: Изд-во АН СССР, 1935. 148 с.
- Волченко Ю.А., Иванов К.С., Коротеев В.А., Оже Т.* Структурно-вещественная эволюция комплексов Платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Часть II // Литосфера. 2007. № 4. С. 73–101.
- Высоцкий Н.К.* Месторождения платины Исковского и Нижне-Тагильского районов на Урале. Труды Геологического комитета. Нов. сер. № 62. СПб., 1913. 692 с.
- Генкин А.Д.* Последовательность и условия образования минералов платиновой группы в Нижнетагильском массиве // Геология руд. месторождений. 1997. Т. 39. № 1. С. 41–48.
- Гурская Л.И.* Развитие идей А.П. Карпинского по выявлению коренных месторождений платиноидов на Урале // Региональная геология и металлогения. 1997. № 7. С. 76–87.
- Ефимов А.А.* Итоги столетнего изучения Платиноносного пояса Урала // Литосфера. 2010. № 5. С. 134–153.
- Заварицкий А.Н.* Коренные месторождения платины на Урале. Л.: Изд-во Геологического комитета, 1928. 56 с.
- Золоев К.К.* Платинотетраэдритовые месторождения Урала, их новые типы и вопросы рудообразования // Геология и металлогения Урала. Екатеринбург. 2000. С. 152–166.
- Золоев К.К., Волченко Ю.А., Коротеев В.А., Малахов И.А., Мардиросьян А.Н., Хрыпов В.Н.* Платинотетраэдритовое оруденение в геологических комплексах Урала. Екатеринбург: ОАО “Уральская геологосъемочная экспедиция”, 2001. 199 с.
- Иванов О.К.* Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1997. 488 с.
- Козлов А.П.* Платинотетраэдритовые месторождения Сейнава-Гальмозанского рудного узла (Корякия) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2007. № 5. С. 47–51.
- Козлов А.П., Чантурия В.А., Сидоров Е.Г., Толстых Н.Д., Телегин Ю.М.* Крупно-объемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-алаянского типа и перспективы их освоения // Геология руд. месторождений. 2011. Т. 53. № 5. С. 419–437.
- Лазаренков В.Г., Малич К.Н., Сахьянов Л.О.* Платинотетраэдритовая минерализация зональных ультраосновных и коматиитовых массивов. Л.: Недра, 1992. 217 с.

- Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Геологический очерк Южно-Заозерской дачи и Денежкина Камня на Северном Урале // Труды СПб. об-ва естествоиспытателей. 1900. Т. 30. Вып. 5. С. 1–257.
- Магматические формации СССР / Под ред. Масайтиса В.Л. Л.: Недра, 1979. Т. 1. 218 с., Т. 2. 280 с.
- Малич К.Н. Платиноиды клинопироксенит-дунитовых массивов Восточной Сибири (геохимия, минералогия, генезис). С-Пб.: картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1999. 296 с.
- Малич К.Н., Баданина И.Ю. Железо-платиновые сплавы хромититов Нижнетагильского и Кондерского клинопироксенит-дунитовых массивов (Россия) // ДАН. 2015. Т. 462. № 6. С. 692–695.
- Малич К.Н., Когарко Л.Н. Вещественный состав платиноидной минерализации Бор-Урехского массива (Маймеча-Котуйская провинция, Россия) // ДАН. 2011. Т. 440. № 6. С. 806–810.
- Малич К.Н., Степанов С.Ю., Баданина И.Ю., Хиллер В.В. Минеральные ассоциации платиноидов Светлоборского, Вересовоборского и Нижнетагильского клинопироксенит-дунитовых массивов Среднего Урала // Вестник Уральского отделения РМО. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2015. № 12. С. 65–83.
- Мосин К.И. История добычи платины на Урале. Нижняя Тура: Нижнетуриная типография. 2002. 246 с.
- Мочалов А.Г. Модель происхождения минералов платиновой группы в габбро-пироксенит-дунитовых кумулятивных комплексах Корякского нагорья (Россия) // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55. № 3. С. 171–188.
- Округин А.В. Кристаллизационно-ликвационная модель формирования платиноидно-хромитовых руд в мафит-ультрамафитовых комплексах // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23. № 2. С. 63–75.
- Округин А.В. Образование крупных самородков платины в хромититовых рудах мафит-ультрамафитовых пород // Наука и образование. 2011. № 3. С. 16–20.
- Попов В.С. Дунит-верлит-клинопироксенитовая магматическая ассоциация: возможные источники и механизм подъема и дифференциации расплавов // Записки РМО. 2005. № 6. С. 1–18.
- Пушкарев Е.В., Аникина Е.В., Гарути Дж., Заккарини Ф. Хром-платиновое оруденение нижнетагильского типа на Урале: структурно-вещественная характеристика и проблема генезиса // Литосфера. 2007. № 3. С. 28–65.
- Служеникин С.Ф. Малосульфидное платиновое оруденение в дифференцированных базит-гипербазитовых интрузивах Норильского района. Автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Москва: ИГЕМ РАН, 2000. 26 с.
- Степанов С.Ю. Онтогенез минералов платиновой группы зональных ультрамафических массивов (Средний Урал) // Матер. конф. "Онтогенез, филогения и система минералогии". Миасс: Институт минералогии УрО РАН. 2015. С. 182–186.
- Столяров С.А. Петрофизическая зональность центральной части Кондёрского и Нижнетагильского массивов и особенности минерализации платиноидов // Матер. Всеросс. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов "Геологи XXI века". Саратов: СО ЕАГО, 2002. С. 120–123.
- Телегин Ю.М., Телегина Т.В., Толстых Н.Д. Геологические особенности рудопоявления платины Светлоборского и Каменушенского массивов Платиноносного пояса Урала // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения: Матер. Третьей междунар. конф. 2009. Т. 2. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН. С. 212–215.
- Толстых Н.Д., Телегин Ю.М., Козлов А.П. Коренная платина Светлоборского и Каменушенского массивов Платиноносного пояса Урала // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 775–793.
- Феруматер Г.Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 367 с.
- Anikina E.V., Malitch K.N., Pushkarev E.V., Shmelev V.R. The Nizhny Tagil and Volkovsky massifs of the Uralian Platinum Belt, and related deposits. Field trip guidebook. 12th International Platinum Symposium. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2014. 48 p.
- Auge T., Genna A., Legendre O., Ivanov K.S., Volchenko Yu.A. Primary platinum mineralization in the Nizhny Tagil and Kachkanar ultramafic complexes, Urals, Russia: A genetic model for PGE concentration in chromite-rich zones // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 707–732.
- Burg J.-P., Bodinier J.-L., Gerya T., Bedini R.-M., Boudier F., Dauria J.-M., Prikhodko V., Efimov A., Pupier E., Balanec J.-L. Translithospheric mantle diapirism: geological evidence and numerical modelling of the Kondyor zoned ultramafic complex (Russian Far-East) // J. Petrol. 2009. V. 50. № 2. P. 289–321.
- Cabri L.J., Feather C.E. Platinum-iron alloys: nomenclature based on a study of natural and synthetic alloys // Can. Mineral. 1975. V. 13. P. 117–126.
- Cabri L.J., Harris D.C., Weiser T.W. Mineralogy and distribution of platinum-group mineral (PGM) placer deposits of the world // Exploration and Mining Geology. 1996. V. 5. P. 73–167.
- Duparc L., Tikhonowitch M. Le platine et les gites platinifères de l'Oural et du Monde. Geneve, 1920. 542 p.
- Guillou-Frottier L., Burov E., Auge T., Gloaguen E. Rheological conditions for emplacement of Ural-Alaskan-type ultramafic complexes // Tectonophysics. 2014. V. 631. P. 130–145.
- Harris D.C., Cabri L.J. Nomenclature of platinum-group element alloys: Review and revision // Can. Mineral. 1991. V. 29. P. 231–237.
- Johan Z. Alaskan-type complexes and their platinum-group element mineralization // The geology, geochemistry and mineral beneficiation of platinum-group elements (Cabri L.J. ed.). Special volume 54. Canadian Institute of mining, metallurgy and petroleum. 2002. P. 669–719.
- Malitch K.N., Thalhammer O.A.R. Pt-Fe nuggets derived from clinopyroxenite-dunite massifs, Russia: a structural, compositional and osmium-isotope study // Can. Mineral. 2002. V. 40. P. 395–418.
- Massalski T.B. (ed.) Binary Alloy Phase Diagrams. Materials Park (Ohio): ASM Intern., 1993. 2224 p.
- Naldrett A.J. Magmatic sulfide deposits: Geology, geochemistry and exploration. Berlin Heidelberg New York, Springer. 2004. 727 p.
- Tolstykh N., Kozlov A., Telegin Yu. Platinum mineralization of the Svetly Bor and Nizhny Tagil intrusions, Ural Platinum Belt // Ore. Geol. Rev. 2015. V. 67. P. 234–243.
- Weiser T., Bachmann H.-G. Platinum-group minerals from the Aikora River area, Papua New Guinea // Can. Mineral. 1999. V. 37. P. 1131–1145.