

А.П. Козлов, А.С. Тимофеев, О.Е. Корнейчик

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАТИНОСОДЕРЖАЩЕЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ СВЕТЛОБОРСКОГО ДУНИТОВОГО МАССИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА MLA*

Методом автоматизированной минералогии (MLA) изучена платиносодержащая минерализация Светлоборского дунитового массива (Средний Урал), что позволило дать полную характеристику ее минерального и гранулярного состава, а так же определить распределение по сросткам различных минералов МПГ. Установлена возможность выделения не менее 50% платиновой минерализации в гравитационные концентраты. Высокая плотность установленных платиносодержащих минералов, которые представлены преимущественно платино-железистыми сплавами (изоферроплатина, тетраферроплатина) и туламинитом, определяет возможность эффективного применения гравитационных методов. Анализ распределения платиноидов по классам крупности позволяет утверждать, что не менее 50% платины может быть выделено в гравитационные концентраты. Наличие в продуктивной ассоциации магнитных платиносодержащих минералов (тетраферроплатина, туламинит) и магнетита, а также их сростков с парамагнитными минералами МПГ (изоферроплатина, сперрилит, осмиридий) создает предпосылки применения магнитной сепарации для дополнительного извлечения до 20% платиновой минерализации из хвостов гравитационного обогащения.

Ключевые слова: платиносодержащая минерализация; метод автоматизированной минералогии; минеральный и гранулярный состав; изоферроплатина; тетраферроплатина; туламинит; сростки; ферромагнетик; парамагнетик; магнитная сепарация.

В настоящее время компанией «Полиметалл» проводится комплекс работ по оценке потенциала и возможности вовлечения в промышленную эксплуатацию платинометалльного оруденения Светлоборского дунитового массива [1], который является коренным источником уникальных россыпных месторождений платины Исковского района на Среднем Урале (рис. 1). Проведенными в ИПКОН РАН минералогическими и лабораторными технологическими исследованиями установлены значительные потери платины с хвостовыми и шламовыми продуктами и указано на не-

обходимость проведения селективной концентрации мелких и тонких классов платиноидов методами флотации и магнитной сепарации [2]. В связи с этим, для обоснования эффективных, как с технологической, так и экономической точки зрения, процессов извлечения платины из дунитов, весьма актуальным представляется проведение комплексных минералогических исследований с детальным изучением технологических свойств продуктивной платиносодержащей минерализации.

Основной задачей проведенных минералогических исследований являлось выделение продуктивных ми-

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

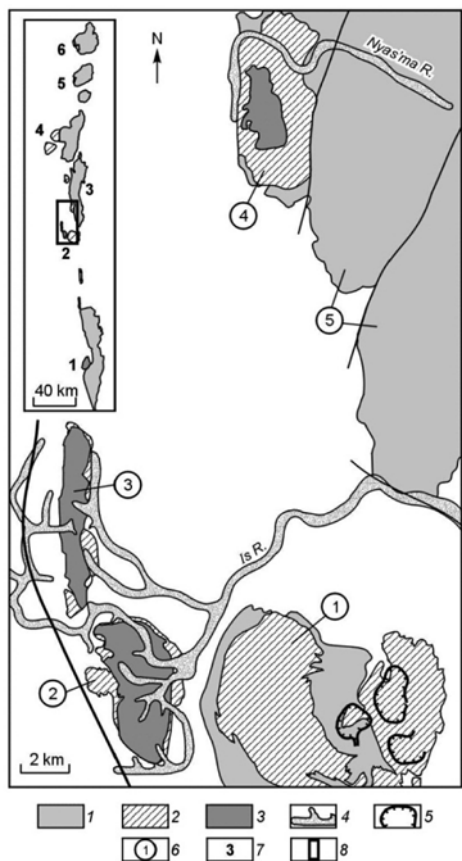


Рис. 1. Карта схема расположения Светлоборского дунитового массива, Платиноносный пояс Урала: 1 – габбро; 2 – пироксениты; 3 – дуниты; 4 – платиновые россыпи; 5 – Гусевогорское титаномagnetитовое месторождение; 6 – интрузивные массивы: Качканарский (1), Светлоборский (2), Вересовоборский (3), Каменушенский (4), Павдинский (5); 7 – Уральский Платиноносный Пояс и выделяемые комплексы (1 – Тагильский, 2 – Качканарский, 3 – Павдинский, 4 – Кытлымский, 5 – Кумбинский, 6 – Денежковский); 8 – расположение врезки

неральных ассоциаций платиноидов в дунитах Светлоборского массива, получение полной характеристики их минерального и гранулярного состава, распределение минералов МПГ по сортам и определение доли свободной поверхности различных минеральных фаз в сортах и включени-

ях. Для проведения исследований из мелкозернистых дунитов были отобраны семь минералого-технологических проб (Выборка № 1), а также образцы дунитов из разведочных канав и скважин, пройденных на рудопроявлении Высоцкого (Выборка № 2).

Процесс выделения продуктивной платиносодержащей минерализации для проведения минералогических исследований заключался в следующем. Материал проб дробился до крупности -2 мм, отмывался в воде, а затем обрабатывался в тяжелой жидкости. Из выделенных гравитационных концентратов при бинокулярном просмотре отбирались все зерна визуально похожие на платиноиды. Далее хвосты подвергались измельчению до крупности $-0,6$ мм с последующим выделением тяжелого концентрата и отбором зерен.

После запрессовки зерен в шашки, в аналитической лаборатории Центра «Ресурсосберегающие технологии переработки минерального сырья» НИТУ «МИСиС» (оператор А.В. Панькин), по каждой выборке был проведен комплекс минералогических исследований с помощью автоматизированной высокоскоростной системы

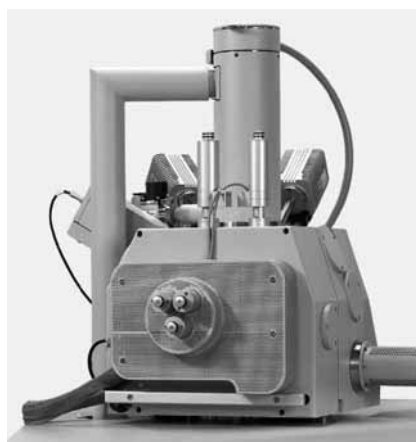


Рис. 2. Внешний вид комплекса автоматизированной высокоскоростной системы минералогического анализа (MLA)

минералогического анализа (MLA), которая представляет собой сканирующий электронный микроскоп с катодом на полевой эмиссии (FEG) и несколькими высокоскоростными энергодисперсионными детекторами (EDS) (рис. 2).

Система MLA позволяет получать изображения и информацию о составе большого количества образцов, а специальное программное обеспечение выдает данные о минеральном и элементном составе минерализации, размере зерен, минеральных ассоциациях и наличии свободных частиц. Одним из основных преимуществ метода является быстрое получение изображений и их высокое качество, которое достигается благодаря источнику электронов высокой яркости, системе высокоскоростного получения данных и полной автоматизации процесса.

Принцип работы системы автоматизированного минералогического анализа MLA заключается в следующем. С помощью сканирующего электронного микроскопа проводится рентгенографический анализ поверхности исследуемой пробы в режиме измерения XBS (одиночный рентгеноспектральный анализ в пределах зерна, идентифицированного на снимке в режиме обратно-отраженных электронов). Одновременно со сканированием поверхности проводится

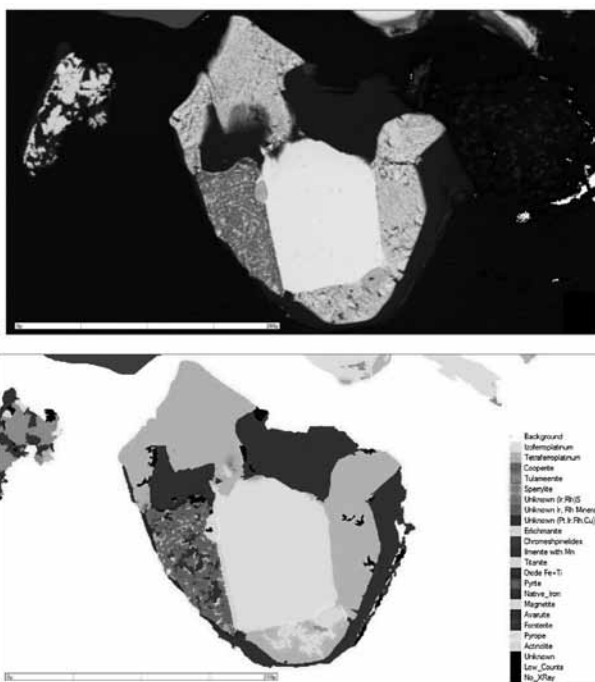


Рис. 3. изображение зерна с минералами МПГ: А – в отраженных электронах; Б – обработанное алгоритмом MLA

пошаговый точечный рентгеноспектральный анализ каждой минеральной фазы. Участки с одинаковым близким элементным составом выделяются в отдельную фазу, окрашенную одним цветом. Далее составляется база данных минералов на основе полученных спектров и построение результирующее изображение классифицированных минеральных частиц (рис. 3).

Представительность полученных результатов обеспечивается значительным количеством изученных зерен платиносодержащих минералов. Суммарно в двух выборках установлено более 4000 зерен платиносо-

Таблица 1

Количество зерен и частиц платиновой минерализации в исследуемых выборках

Номер выборки	Количество зерен	Количество частиц
1	848	4364
2	3362	13 235

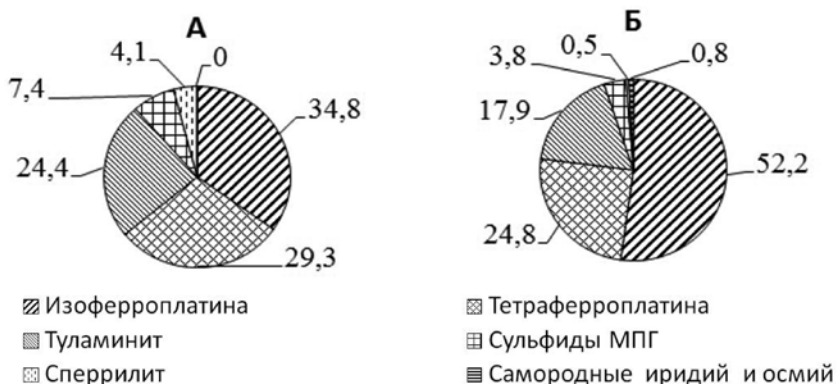


Рис. 4. Минеральный состав платиносодержащей минерализации в дунитах Светлоборского массива, масс. %: А – выборка № 1; Б – выборка № 2

державших минералов, в пределах которых системой МПА выделено 17600 частиц различных минеральных фаз (табл. 1).

В составе выделенной платиносодержащей минерализации доминируют платино-железистые сплавы, представленные изоферроплатиной (Pt_3Fe) 34,8–52,2 масс.% и тетраферроплатиной ($PtFe$) 24,8–29,3 масс.% (рис. 4). Значительным распространением в дунитах Светлоборского массива также пользуется туламинит (Pt_2FeCu) 17,9–24,4 масс.%. В под-

чиненном количестве находятся сульфиды и сульфоарсениды МПГ 3,8–7,4 масс.%, сперрилит ($PtAs_2$) до 4,1 масс.% и осмиридий (Ir, Os) до 0,8 масс.%.

Исследования гранулярного состава платиносодержащей минерализации показали, что половина зерен платиноидов находится в мелких и тонких классах крупности (-80 мкм) (рис. 5). При установленной максимальной крупности 400 мкм, среднеарифметический размер зерен составляет 90–95 мкм.

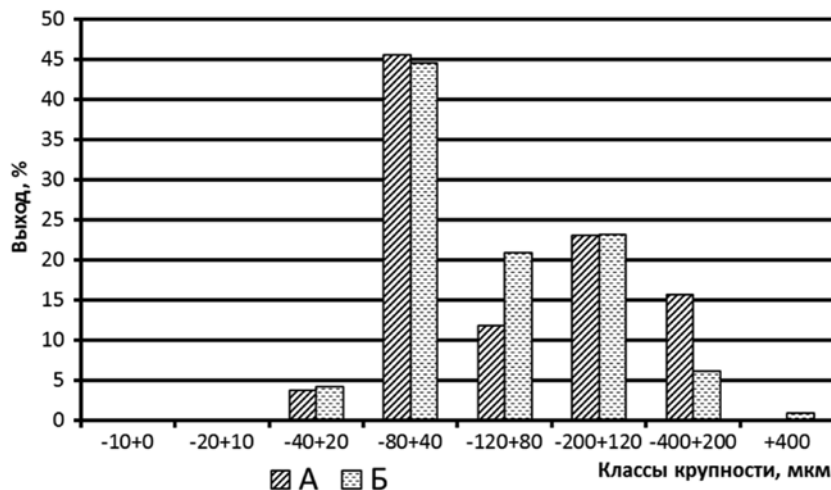


Рис. 5. Массовое распределение платиносодержащей минерализации в дунитах Светлоборского массива по классам крупности, масс. %: А – выборка № 1; Б – выборка № 2

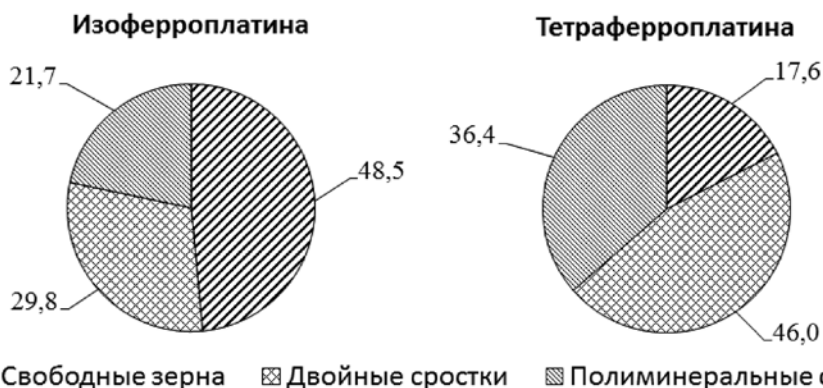


Рис. 6. Характеристика раскрытия зерен изоферроплатины и тетраферроплатины в дунитах Светлоборского массива

Изучение сростков основных продуктивных минеральных фаз МПГ свидетельствует о том, что значительная часть изоферроплатины 42,1–54,9 масс.% находится в виде свободных зерен. Для трети зерен (24,2–35,3 масс.%) характерны двойные сростания с тетраферроплатиной или туламинитом. Пятая часть изоферроплатины находится в полиминеральных сростках. Незначительное количество изоферроплатины (7 масс.%) находится в сростках с породообразующим форстеритом.

Для тетраферроплатины характеристика сростания несколько иная и в виде свободных зерен находится лишь 12,5–22,6 масс.%. В двойных сростках (42,7–49,3 масс.%) тетраферроплатина находится в основном с изо-

ферроплатиной и в меньшей мере с породообразующим форстеритом. К полиминеральным сросткам и включениям относится 28,1–44,7 масс.% тетраферроплатины.

В процессе минералогических исследований установлено, что платина в дунитах Светлоборского массива присутствует исключительно в собственных минеральных формах, доминирующими среди которых являются платино-железистые сплавы (изоферроплатина и тетраферроплатина). Это позволяет рассматривать возможность извлечения платины из дунитов как выделение установленной платиносодержащей минерализации.

Контрастные технологические свойства основных платиносодержащих минералов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технологические свойства основных минералов платиносодержащей минерализации Светлоборского массива

Минералы	Морфология выделений	Плотность, г/см ³	Микротвердость, кг/мм ²	Магнитная восприимчивость, $\mu 10^{-6}$ см ³ /г
Изоферроплатина	Самостоятельные зерна и сложные минеральные сростки	14,0–19,5	320–480 (440)	1
Тетраферроплатина			300–350 (320)	ферромагнетик
Туламинит			135–175 (155)	ферромагнетик
Сперрилит		10,5–10,7	690–1085 (890)	парамагнетик

Важнейшим свойством минералов МПГ является высокая плотность, вариации которой от 10,5–19,5 г/см³ обусловлены содержанием платины в минеральной форме [3]. Минимальное значение для сперрилита, содержащего 52,8–56,9 масс.% Pt, и максимальное для изоферроплатины – 86,5 масс.% Pt.

Платиносодержащая минерализация может эффективно извлекаться гравитационными методами, однако значительная часть платиноидов (~50 масс.%) находится в мелких и тонких классах крупности (-80 мкм), что весьма неблагоприятно для гравитационного извлечения. Прогнозная оценка извлечения платиноидов методом гравитации, основанная на установленном гранулярном составе, составляет не менее 50% от общей массы платиновой минерализации.

Особенности измельчения рудоносных дунитов и раскрываемости продуктивной минерализации будут определяться низкой микротвердостью основных платиносодержащих минералов (изоферроплатина 440 кг/мм², тетраферроплатина 320 кг/мм², туламинита 155 кг/мм²) на фоне относительно высокой микротвердости основного породобразующего минерала – форстерита (925 кг/мм²) [3]. Это определяет возможность переизмельчения крупных зерен платиноидов и увеличение выхода платины в тонких классах, представляющих проблему для извлечения методами гравитации.

Часть платиносодержащей минерализации, представленная тетраферроплатиной и туламинитом, имеет выраженные магнитные свойства. Значительное количество кристаллохимически упорядоченной изоферроплатины, сперрилита и сульфоарсенидов МПГ, которые являются парамагнетиками с низкой магнитной восприимчивостью, образует срост-

ки с магнитными минералами МПГ и вторичным магнетитом. Установленное в процессе минералогических исследований массовое количество минералов МПГ, имеющих выраженные магнитные свойства, а также значительная часть зерен, в которых они находятся в сростании с платиносодержащими минералами – парамагнетиками, свидетельствует о возможности эффективного применения магнитных методов и позволяет прогнозировать дополнительное извлечение до 20% платиновой минерализации в тонких и мелких классах крупности из хвостовых продуктов гравитационного обогащения.

Основные выводы

1. Важнейшей особенностью платинометального оруденения в дунитах Светлоборского массива является наличие платины исключительно в собственных свободных минеральных формах.

2. Высокая плотность установленных платиносодержащих минералов, которые представлены преимущественно платино-железистыми сплавами (изоферроплатина, тетраферроплатина) и туламинитом, определяет возможность эффективного применения гравитационных методов. Анализ распределения платиноидов по классам крупности позволяет утверждать, что не менее 50% платины может быть выделено в гравитационные концентраты.

3. Тесные сростания парамагнитных минералов МПГ (изоферроплатина, сперрилит, осмиридий) с магнитными платиносодержащими минералами (тетраферроплатина, туламинит) и вторичным магнетитом создает предпосылки для применения магнитной сепарации, что может позволить дополнительно выделить из хвостов гравитационного обогащения до 20% платины.

1. 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.
2. Козлов А.П., Матвеева Т.Н., Толстых Н.Д., Федотов К.В., Чантурия В.А. Разработка технологических процессов извлечения платины из дунитов Платиноносного пояса Урала // Обогащение руд. – 2013. – № 5. – С. 8–16.
3. Дорошенко М.В., Башлыкова Т.В. Технологические свойства минералов. – М.: Теплоэнергетик, 2007. – 296 с. **MLA**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Козлов Андрей Петрович – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, e-mail: kozap@mail.ru,
Тимофеев Александр Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник, e-mail: timofeev_ac@mail.ru.
Корнейчик Олег Евгеньевич – аспирант, e-mail: oleg@technoinfo.co.uk, ИПКОН РАН.

UDC 622.7

ANALYSIS OF PLATINUM CONTENT OF SVETLOBORSKY DUNITE ORE BODY USING MLA AUTOMATED SYSTEM

Kozlov A.P., Doctor of Technical Sciences, Deputy Director on Scientific Work, e-mail: kozap@mail.ru,
Timofeev A.S., Graduate Student, Junior Researcher, e-mail: timofeev_ac@mail.ru.
Korneichik O.E., Graduate Student, e-mail: oleg@technoinfo.co.uk, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences.

Platinum-mineralization of Svetloborsky dunite massif (Middle Urals) was studied using automated mineralogy method (MLA) to give a full description of its mineral and granular composition, as well as to determine the distribution of various PGM in intergrowths. The possibility of allocating at least 50% of the platinum mineralization in gravity concentrates was shown.

High density of located platinum minerals, which are mainly represented by the platinum-iron alloys (isoferroplatinum, tetraferroplatinum) and tulaminit determines the possibility of effective application of gravitational methods. Analysis of the distribution of platinum on the size classes suggests that at least 50% of platinum can be recovered in the gravity concentrates.

The presence in the productive association of magnetic minerals of platinum (tetraferroplatinum, tulaminit) and magnetite, as well as their intergrowths with paramagnetic PGM (isoferroplatinum, sperrylite, osmiridy) creates the preconditions for the application of magnetic separation for additional recovery of up to 20% of the platinum mineralization from gravity concentration tails.

Key words: platinum-bearing mineralization; automated mineralogy; mineral and granular structure; isoferroplatinum; tetraferroplatinum; tulaminit; splices; ferromagnet; paramagnet; magnetic separation.

REFERENCES

1. Tolstykh N.D., Telegin Yu.M., Kozlov A.P. *Geologiya i geofizika*, 2011, vol. 52, no 6, pp. 775–793.
2. Kozlov A.P., Matveeva T.N., Tolstykh N.D., Fedotov K.V., Chanturiya V.A. *Obogashchenie rud*, 2013, no 5, pp. 8–16.
3. Doroshenko M.V., Bashlykova T.V. *Tekhnologicheskie svoystva mineralov* (Processing characteristics of minerals), Moscow, Teploenergetik, 2007, 296 p.