

УДК 622.7; 550.4

**ПЛАТИНОВЫЕ МЕТАЛЛЫ АПОДУНИТОВЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ  
И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ОБОГАЩЕНИЯ  
В ГРАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ**

**Т. Н. Александрова, И. В. Таловина**

*Санкт-Петербургский горный университет, E-mail: talovina@spmi.ru,  
21-я линия, В.О., 2, 199106, г. Санкт-Петербург, Россия*

Приводится анализ геохимических данных, полученных в результате исследования кор выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов платиноносного пояса Урала на содержание элементов платиновой группы, золота и серебра в разных зонах профиля выветривания. Освещен вопрос теории гравитационного разделения во взвесенесущих потоках. Адаптирован критерий оценки возможности эффективного обогащения в гравитационных аппаратах (коэффициент гидравлического разделения), альтернативный коэффициенту равнопадаемости, но учитывающий влияние формы частицы. Показаны результаты расчетов коэффициента гидравлического разделения для частиц оливина и платины различной формы, указывающие на более эффективное разделение уплощенных частиц в гравитационно-центробежных аппаратах. Теоретические положения подтверждены экспериментальными данными, сделан вывод о правомочности применения предложенного коэффициента гидравлического разделения.

*Платиноиды, коры выветривания, гравитационное обогащение, центробежная сепарация, отсадка, критическая скорость, коэффициент гидравлического разделения, платина, золото, морфологические особенности, Светлоборский массив, Нижнетагильский массив*

В связи с истощением запасов россыпных месторождений платины в России вопрос поисков и освоения новых и альтернативных источников платиновых металлов в последние десятилетия становится все более актуальным. Интересными представляются массивы платиноносного пояса Урала, освоенного промышленного региона, в котором выделяются два крупнейших в мире россыпеобразующих зональных массива — Светлоборский и Нижнетагильский.

В отличие от хорошо изученных и эксплуатирующихся уже в течение 200-летнего периода россыпей, коры выветривания, развитые по обоим массивам, до сих пор подробному исследованию не подвергались. Тем не менее многими уральскими учеными уже в начале XX в. отмечалось поисковое значение элювия платиноносных массивов Урала, где старатели не раз наталкивались на коренные проявления платины. В мировой практике известно множество примеров выявления промышленных концентраций элементов платиновой группы (ЭПГ) в корях выветривания по ультраосновным массивам [1]. Обогащенными благородными металлами являются никелевые месторождения кор выветривания Кубы (Моа и Никаро), Новой Каледонии,

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00460 А).

Индонезии (Сороако, Помалеа), Австралии (Гринвейл, Рокгемптон), Польши (Шкляры), Бразилии, России, в том числе Серовское, Уфалейское, Буруктальское, Сахаринское гипергенные никелевые месторождения Урала [2]. С этой точки зрения весьма актуально широкомасштабное проведение поисково-разведочных работ Светлоборского и Нижнетагильского массивов по изучению коренных рудопроявлений платины [3, 4].

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЛАТИНОНОСНОСТЬ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ СВЕТЛОБОРСКОГО И НИЖНЕТАГИЛЬСКОГО МАССИВОВ

Коры выветривания в пределах рассматриваемых массивов характеризуются сокращенным профилем и прерывистым характером распространения. Их мощность не превышает 20 м на Светлоборском массиве и 10 м на Нижнетагильском. В профиле выветривания преобладает серпентинитовая зона, сложенная внизу разреза дезинтегрированными лизардит-хризотилowymi, выше — выщелоченными лизардитовыми серпентинитами. На Светлоборском массиве серпентиниты перекрываются глинами сапонитового состава. Оксидно-железная зона в профиле выветривания отсутствует, однако наблюдается некоторое обогащение его верхних зон гидроксидами железа и марганца (рис. 1). Кора карманообразно залегает на серпентинизированных дунитах, наблюдается в бортах логов, отдельные интервалы ее вскрыты расчистками.

Химический состав пород различных зон профиля выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов исследовался методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Анализ проб выполнялся в лабораториях ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и в Центральной аналитической лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института (ВСЕГЕИ). Концентрации элементов платиновой группы (ЭПГ), золота и серебра в различных зонах профиля выветривания массивов представлены в табл. 1.

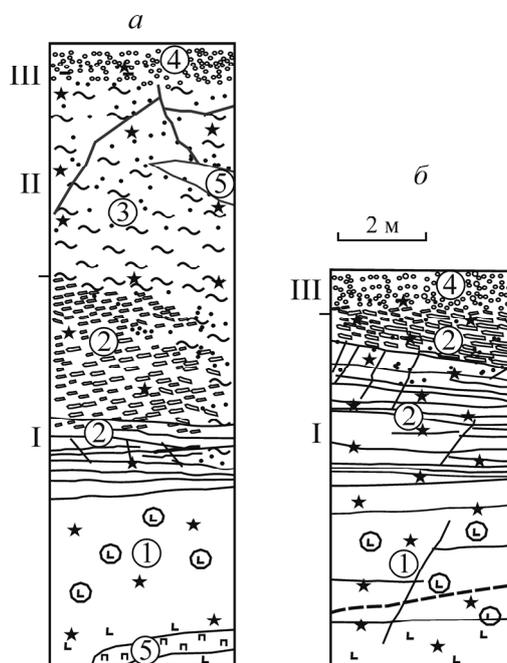


Рис. 1. Профиль кор выветривания Светлоборского (а) и Нижнетагильского (б) массивов. Зоны выветривания: I — серпентинитовая; II — нонтронитовая; III — элювиально-делювиальные отложения; 1 — хризотилловые серпентиниты; 2 — трещиноватые и плитчатые хризотил-лизардитовые серпентиниты; 3 — нонтронитовые глины; 4 — элювиально-делювиальные отложения; 5 — горнблендитовые, клинопироксенитовые дайки и жилы

ТАБЛИЦА 1. Среднее содержание ЭПГ в корях выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов, мг/т

Массив	№	n	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	□ ЭПГ	Pt/Pd	Au	Ag
Светлоборский	1	1	<2	4	<2	<2	4.1	>11	4.1	<2	<10
	2	6	$\frac{2}{1}$	5.3	26.8	11	341.3	386.4	12.72	70	<10
	3	6	$\frac{1}{1}$	3.7	16.2	5.7	108.3	134.9	6.68	30	<10
Нижнетагильский	4	10	$\frac{<2}{—}$	3.6	11.4	6	53	75	4.62	4	11
	5	2	$\frac{<2}{—}$	5	65.5	10	44	124.5	0.67	4.4	10.5
	6	5	4.4	<5	3.4	<10	24.17	>39.47	7.11	Н.о.	Н.о.

Примечание. n — число проб; Н.о. — не обнаружено; 1, 4 — зона лизардит-хризотилловых серпентинитов; 2, 5 — зона лизардитовых серпентинитов; 3 — глинистая сапонитовая зона; 6 — неизмененные дуниты Нижнетагильского массива с глубины 403–453 м [1]

По данным табл. 1, для коры выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов характерна палладий-платиновая специализация с повышенными концентрациями Au и Ag. Она отличается от коренной минерализации самих массивов, которая в дунитах Нижнетагильского массива преимущественно иридий-платиновая [5, 6]. Отношение Pt/Pd > 1 практически во всех зонах профиля выветривания обоих массивов, за исключением зоны выщелачивания, где в лизардитовых обохренных серпентинитах Светлоборского массива оно падает до 0.67.

Платинометалльная минерализация кор выветривания практически полностью идентична составу минералов платиновых металлов в серпентинизированных дунитах массивов, связана с тонкими прожилками и вкрапленностью магнетита и хроммагнетита и представлена главным образом изоферраплатиной с размером зерен от 10 до 50 мкм. К аксессуарным минералам относятся медно-никелевые сульфиды, самородная медь и золото.

Морфология и гранулометрия зерен платиносодержащих минералов в протолочках серпентинизированных дунитов Светлоборского массива детально изучена в [7]. Исследования показали, что 40 % платинового концентрата на Светлоборском и 60 % на Нижнетагильском массивах относятся к магнитной фракции, что не позволяет предлагать магнитную сепарацию как метод концентрирования платины.

Установлено, что основные минералы тяжелой фракции кор выветривания массивов представлены оливином, пироксеном, хромитом, магнетитом, титаномагнетитом и др., встречается также кварц. По массовой доле из рудных минералов доминирует магнетит, титаномагнетит и хромит. Сульфиды, рутил, сфен, амфиболы, гранат отмечены в единичных зернах, апатит — в количестве первых сотых долей процента.

Оливин присутствует в обломках округлой формы светло-желтого цвета, иногда бесцветных, часто с зеленоватым оттенком, прозрачных, с матовой поверхностью. На сколах наблюдается сильный жирный блеск, по краям зерен и в трещинах часто примазки красновато-коричневых гидроксидов железа. Размер зерен оливина варьирует от 0.1 до 2 мм, встречаются и более мелкие зерна. Отмечается во всех фракциях, кроме магнитной, в большей степени концентрируется во 2-й и 3-й электромагнитной фракциях.

Хромит представлен крупными зернами, в основном бесформенными, ближе к округлым. Поверхность матовая, лишь на сколах обнаруживается сильный блеск. Большая часть зерен имеет размер от 0.2 до 0.5 мм. Мелкие зерна и их обломки часто имеют октаэдрическую форму, черный цвет и сильный блеск. Минерал обладает различной степенью магнитной восприимчивости, поэтому присутствует во всех электромагнитных фракциях, отдельные зерна встречаются в немагнитной фракции.

Магнетит и титаномагнетит сравнительно равномерно распределены по классам крупности. Крупные зерна в виде бесформенных обломков со сглаженной поверхностью имеют черный цвет, в небольших выбоинах и трещинах наблюдаются примазки глинистого светло-коричневого материала. В мелких зернах (менее 0.25 мм) появляется магнетит в форме октаэдров и их обломков в виде блестящих зерен с гладкой поверхностью.

Платина встречается в виде комковатых зерен неправильной формы различной степени окатанности, а также угловато-комковатых зерен с мелкобугристой неровной поверхностью, имеющих амебовидные углубления и скрученные отростки. Наблюдаются отдельные изометричные зерна со сравнительно ровной поверхностью. Цвет зерен от серебристо-белого или оловянно-серого до темно-серого или свинцово-серого. Большинство зерен тусклые, отдельные зерна с сильным металлическим блеском (рис. 2). Размер выделенных зерен платины варьирует от 0.07 до 1 мм. Часто на поверхности зерен платины фиксируются примазки светло-коричневого цвета, представленные гидроксидами железа с глинистыми налетами в углублениях.

Характеристика основных физических свойств минералов, слагающих материал продуктивного класса, приведена в табл. 2. Анализ данных свидетельствует о том, что более контрастным показателем для минералов является показатель плотности. Цветные минералы имеют более высокую степень контрастности гравитационных свойств, что может быть использовано для их первичной концентрации.

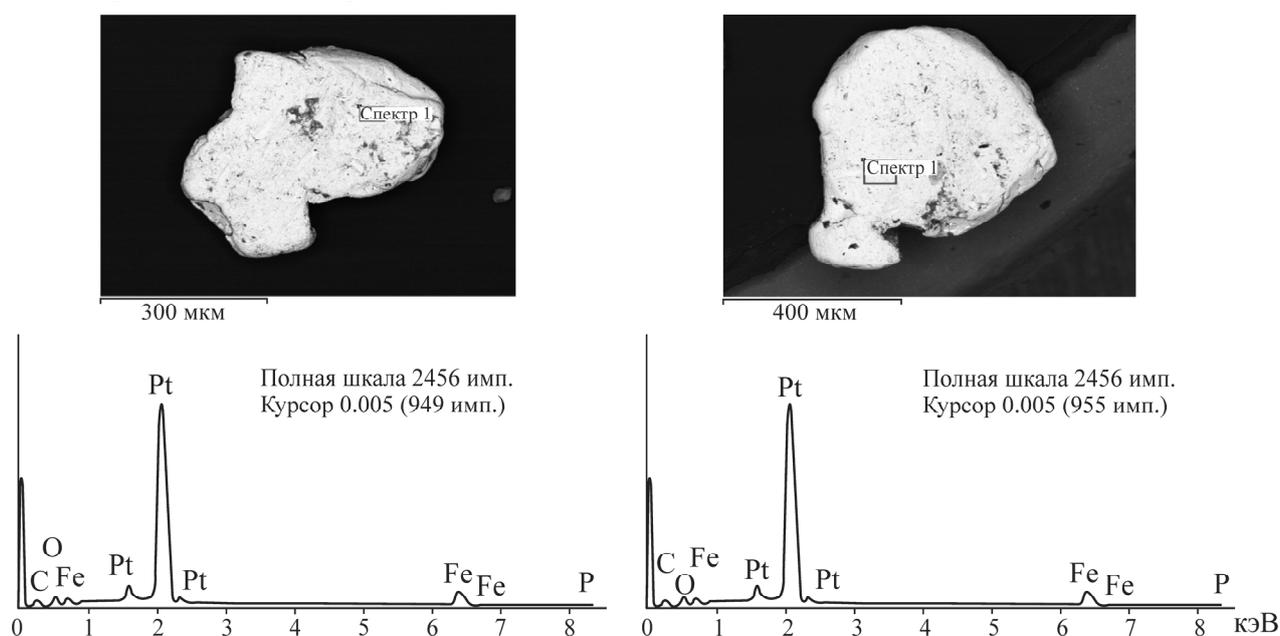


Рис. 2. Микрофотографии зерен платины и результаты локального микрорентгеноспектрального анализа

ТАБЛИЦА 2. Физические свойства основных минералов тяжелой фракции кор выветривания

Минералы	Химическая формула	Плотность $\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная магнитная восприимчивость, $\chi \cdot 10^{-6}$ см <sup>3</sup> /Г
Оливин	(Mg, Fe)[SiO <sub>4</sub> ]	3.0–4.4	18
Пироксены	CaMg[Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	3.0–3.5	40–60
Кварц	SiO <sub>2</sub>	2.5–2.8	–0.5
Магнетит, титаномагнетит	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	4.8–5.3	> 3000 до 80000
Хромит	FeCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.0–5.1	36.8–267.0
Платина	Pt	14.0–19.5	0.9–1.0
Золото	Au	15.6–18.3	—

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ В ГРАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТАХ

При обогащении рыхлого дезинтегрированного материала кор выветривания наибольшее влияние на гравитационные процессы оказывают морфологические характеристики частиц благородных металлов — крупность, форма, степень окатанности и др. В отличие от рудного сырья здесь нет необходимости в операциях дробления и измельчения, которые изменяют крупность и форму частиц до запроектированных пределов. Задача подготовительных процессов состоит в том, чтобы дезинтегрировать пески и выделить продукт, в котором самородный металл представлен широким классом крупности и не изменены его морфологические характеристики [8–11].

Практика промывки делювия на шлюзах отвечает условиям, при которых разница размеров частиц, например золота и сланца, образующих хвосты, более чем на порядок превышает коэффициент равнопадаемости.

Существующие гравитационные аппараты можно разделить на центробежные и вибрационные. На каждом из них эффективнее обогащается материал с тем или иным коэффициентом формы, так как условия приложения сил и соответственно коэффициенты гидравлического взвешивания различны в зависимости от морфологии частиц и типа применяемого оборудования [9].

По алгоритму, разработанному в [9, 10] с учетом выражения для коэффициента гидравлического разделения  $K_p$ , под которым понимается отношение размера наибольшей частицы легкой породы к размеру наибольшей частицы тяжелого компонента, теряющей состояние покоя на неподвижной или вибрирующей плоскости, выполнены расчеты для условий разделения оливина и платины.

Общее выражение для расчета  $K_p$  (для частицы тяжелой породы минимального размера введем индекс “+”) твердых частиц потока суспензии в поле сил тяжести и вибрации с учетом математических выкладок, изложенных в [9, 11, 12], имеет вид

$$K_p = \frac{d}{d_+} = \frac{a^2 b^2 \delta_+ \theta_+ \left( \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{K_+} - \frac{\delta_+ + 1}{\delta_+} \frac{F}{K_+} \right)}{a_+^2 b_+^2 \delta \theta \left( \cos \alpha - \frac{\sin \alpha}{K} - \frac{\delta + 1}{\delta} \frac{F}{K} \right)},$$

где  $d$  — диаметр частиц вмещающей породы (оливина);  $d_+$  — диаметр частиц тяжелой породы (платины);  $a$  — постоянная Ландау – Левича;  $b$  — постоянная, учитывающая работу взвешивания и распределения скорости по течению потока;  $\delta$  — относительная плотность твердой частицы;  $\theta = \varphi^2 / \psi$  — эмпирический коэффициент, где  $\varphi = W / Sd$  ( $W$  — объем твердой частицы;  $S$  — наибольшая площадь сечения твердой частицы плоскостью, параллельной основанию потока;  $W/S$  — некоторый приведенный размер твердой частицы, определенный по направлению перпендикуляра к основанию потока);  $K$  — коэффициент трения;  $F$  — характеристика интенсивности вибрации;  $K_+$  — коэффициент гидравлического разделения для частицы тяжелой породы;  $\varphi = W / Sd$  — первый коэффициент формы частицы;  $\psi$  — эмпирический коэффициент, характеризующий идеализированную форму частицы (для куба равен 2, для уплощенной частицы – 1.07) [9].

Введем ограничения: считаем легкую породу оливином ( $\delta = 3.1$ ), частицы которого по форме совпадают с формой двух сложенных шаровых сегментов. Задача определения коэффициента гидравлического разделения решена методом последовательных приближений с использованием интегрированной среды MathCad. Рассчитанные значения коэффициента гидравлического взвешивания для идеализированных форм частиц, близких к формам реальных частиц, для системы “оливин – платина” приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Значение коэффициента гидравлического взвешивания

Оливин (Mg,Fe)[SiO <sub>4</sub> ]		Платина		Коэффициент гидравлического взвешивания для аппаратов	
Коэффициент формы				гравитационно- центробежных	гравитационно- вибрационных
$\psi$	$\varphi$	$\psi$	$\varphi$		
				65.2	105.0
1.07	0.334	2	1		
1.07	0.334			60.2	21.0
	2.0	0.2			

Из табл. 3 видно, что для хорошо окатанных частиц платины преимущество должно быть отдано аппаратам гравитационно-вибрационного действия. При наличии в продуктивных горизонтах платиноидов уплощенной или лепешкообразной формы следует использовать центробежные или винтовые аппараты.

Данные выводы подтверждаются результатами лабораторных исследований на обогатимость [10]. Доизвлечение тонких классов платиноидов из хвостов гравитационного обогащения эффективно методом флотации с использованием комплексообразующих реагентов [12].

## ВЫВОДЫ

Исследование кор выветривания Светлоборского и Нижнетагильского массивов платиноносного пояса Урала показало, что для них характерна палладий-платиновая специализация с повышенными концентрациями Au и Ag. Платинометаллическая минерализация кор выветривания практически полностью идентична составу зерен платиновых металлов в серпентинизированных дунитах массивов, связана с тонкими прожилками и вкрапленностью магнетита и хроммагнетита и представлена главным образом изоферроплатиной с размером зерен от 10 до 50 мкм.

По адаптированному алгоритму расчета коэффициента гидравлического разделения установлено, что для частиц платиноидов уплощенной формы эффективнее применять гравитационно-центробежные аппараты. Использование технологии центробежной сепарации с целью первичной концентрации позволяет достигнуть усредненного извлечения платины в концентрат до 86–88%. Принимая во внимание высокую контрастность технологических свойств минералов в корах выветривания уральских массивов, наиболее перспективным процессом основной концентрации платины является винтовая сепарация. Доизвлечение тонких классов платиноидов из хвостов гравитационного обогащения эффективно методом флотации с использованием комплексобразующих реагентов.

В работе принимали участие ассистенты Горного университета: к.т.н. С. А. Корчевенков и к.г.-м.н. А. М. Дурягина.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазаренков В. Г., Таловина И. В., Белоглазов И. Н., Володин В. И. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения. — СПб.: Недра, 2006. — 188 с.
2. Таловина И. В. Геохимия Уральских окисдно-силикатных никелевых месторождений. — СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет “Горный”, 2012. — 270 с.
3. Козлов А. П., Чантурия В. А., Сидоров Е. Г., Толстых Н. Д., Телегин Ю. М. Крупнообъемные рудные месторождения платины в зональных базит-ультрабазитовых комплексах урало-аляскинского типа и перспективы их освоения // Геология рудных месторождений. — 2011. — Т. 53. — № 5. — С. 419–437.
4. 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.
5. Ферштатер Г. Б., Беа Ф., Пушкарев Е. В., Гарути Дж., Монтеро П., Заккарини Ф. Новые данные по геохимии платиноносного пояса Урала: вклад в понимание петрогенезиса // Геохимия. — № 4. — 1999. — С. 352–370.
6. Auge T., Genna A., Legendre O. Primary platinum mineralization in the Nizhny Tagil and Kachkanar ultramafic complexes, Urals, Russia: A genetic model for PGE concentration in chromite-rich zones, Economic Geology, 2005, Vol. 100. — P. 707–732.
7. Толстых Н. Д., Козлов А. П., Телегин Ю. М. Коренная платиновая минерализация Светлоборского и Нижнетагильского массивов. Платиноносный пояс Урала // Платина России. — 2012. — С. 297–312.
8. Aleksandrova T. N., Aleksandrov A. V., Litvinova N. M., Bogomyakov R. V. Basis and development of gold loss reduction methods in processing gold-bearing clays in the Khabarovsk territory, J. of Mining Science, 2013, Vol. 49, No. 2. — P. 319–325.
9. Александрова (Мельникова) Т. Н., Бойко В. Ф. Природно-техногенные свободнодисперсные системы. Происхождение. Эволюция. — Хабаровск: Изд-во Хабар. ГТУ, 2005. — 180 с.
10. Aleksandrova T. N., Litvinova N. M., Aleksandrov A. V., Korchevenkov S. A., Bogomyakov R. V. Analysis of losses of noble metals and rational methods of their decreasing in the time of development of placers, Tsvetnye Metally, 2014, No. 5. — P. 60–63.
11. Das S. K., Godiwalla Lopamudra Panda K. M., Bhattacharya, Ratnakar Singh K. K., Mehrotra S. P. Mathematic modeling of separation characteristics of a coal-washing spiral, Int. J. Miner. Process, 2007, No. 84. — P. 118–132.
12. Пат. RU 2576715 С1. Способ повышения извлечения платиноидов из нетрадиционного платиносодержащего сырья / Т. Н. Александрова, Н. В. Николаева, А. О. Ромашев, У. М. Янсон // Оpubл. в БИ. — 2016. — № 7. — С. 10.

Поступила в редакцию 10/III 2017