
ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.84; 553.08

DOI:10.7242/echo.2019.4.1

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ХРОМИТОВЫХ РУД САРАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАК ИСТОЧНИКА ХРОМА И ПЛАТИНИДОВ

А.Ю. ПУЗИК

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представлены результаты изучения вещественного состава хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения. Применение комплекса методов, включающих гравитационное обогащение с выделением концентратов из тонких фракций и комплекса аналитических методов, включающих масс-спектрометрию, электронную микроскопию и микрозондовый анализ, показало возможность получения концентратов, содержащих промышленные количества хрома и значимых содержаний платиноидов.

Ключевые слова: гравитационное обогащение, хромитовый концентрат, минералы платиновых металлов, масс-спектральный анализ, электронная микроскопия, микрозондовый анализ.

Хромовые руды являются важнейшим сырьём черной металлургии. Мировое потребление хромовых руд неуклонно увеличивается. Основные месторождения хрома в России: Главное Сарановское и Южно-Сарановское месторождения (оба в Пермском крае), Аганозёрское (республика Карелия), Сопчеозёрское (Мурманская область). Среди этих месторождений активно разрабатывается только Главное Сарановское месторождение, запасы которого оцениваются в 4,7 миллионов тон, что составляет только 11% запасов представленных месторождений (Госдоклад, 2017). Тем не менее ОАО "Сарановская шахта "Рудная" является крупнейшим и важнейшим предприятием в России по добыче и переработке (обогащению) хромитовых руд. В настоящее время разрабатываются три наиболее мощных пласта, известные как Западное, Центральное и Восточное рудные тела с близким составом руд. Добытая руда проходит обогащение на обогатительной фабрике, которая находится непосредственно на промышленной площадке шахты и связана с ней, в единую технологическую цепочку. Характеристике его геологического строения посвящены многочисленные публикации. Они были начаты работами В.А. Вознесенского (1916), С.А. Вахромеева, И.А. Зимина, Ю.А. Волченко и других. Монографическое описание строения и состава рудных тел, методики их опробования сделано В.Ф. Мягковым и В.Л. Баталовым, а самого месторождения и в целом сарановского магматического комплекса с детальной характеристикой его петрографического состава – О.К. Ивановым.

В связи со сложившейся тенденцией сырьевой зависимости от импорта и нехватка собственного сырья в данной отрасли РФ, представляется актуальным вовлечение отходов обогащения хромитовых руд (хвостов). Автором изучен вещественный состав хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения (Сарановская шахта Рудная – СШР) и проведены эксперименты по обогащению хвостов, с целью получения дополнительного источника хрома, улучшению экологической обстановки района и оценки возможности извлечения минералов платиновых металлов.

Главное Сарановское месторождение расположено на западном склоне Среднего Урала в Пермском крае (Россия) и разрабатывается с 1930-х гг. В процессе освоения северного

фланга Главного Сарановского месторождения, при обогащении руд, был сформирован отвал хвостов обогащения, складированных на территории предприятия (рис. 1).

По периметру отвала отбирались горстьевые пробы объемом по 30 кг.



Рис. 1. Фотография конуса хвостов с местами отбора проб (GoogleEarthPro)

На рисунке 1, показаны места отбора проб, а в таблице 1 представлены данные объемов опробования.

Таблица 1

Масса отобранных проб, кг

Номер пробы	Ориентация	Масса, кг
SR-1	цент	30
SR-2	подошва	30
SR-3	цент	30
SR-4	кровля	30
SR-5	подошва	30
SR-6	цент	30
SR-7	кровля	30
SR-8	кровля	30
SR-9	цент	30
SR-10	подошва	30
SR-11	цент	30
SR-12	подошва	30
SR-13	кровля	30

Из проб методом рассева выделялась фракция меньше 2 мм и рассчитывался процент ее содержания по контуру отвала. Для этой операции, применялись ручные сита с размерами ячеек 4 и 2 мм и на выходе, получалось три фракции. Минеральный состав в необогащаемых, без дополнительной подготовки, фракциях больше 2 мм, был изучен с помощью стереомикроскопа Leica EZ4. Данная операция необходима для определения процентного содержания рудного компонента в необогащаемой, без дополнительной подготовки, фракции больше 2 мм.

С учетом высокого удельного веса хромита ($4,2-4,8 \text{ г/см}^3$) обогащение проводилось на винтовом сепараторе (Полькин, 1987). Обогащению на винтовом сепараторе, подвергалась фракция меньше 2 мм, как наиболее представительная в объеме и не требующая дополнительной подготовки.

Минеральный и химический составы проб были изучены в лаборатории Сектора наноминералогии ПГНИУ. Применялся комплекс аналитических методов таких как, рентгенофазовый метод для определения минерального состава, рентгенофлуоресцентный метод для определения химического состава образцов. Для выявления морфологии платиновых минералов использовался метод электронной микроскопии, а для определения количественного содержания элементов группы платины применялся метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

Ситовой анализ показал, что в отвале преобладает размер частиц меньше 2 мм и составляет две трети всего отвала. Среднее значение по всем пробам 71 % фракции меньше 2 мм и 29% фракции больше 2 мм.

Результаты изучения минерального состава необогащаемой, без предварительной подготовки, фракций более 2 мм усреднены и сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Минеральный состав фракций 2-4

Название	Масса, гр.	%
Хромит	145.7	33.5
Силикаты	277.7	64.7
Кальцит	6.8	1.8
Сумма	429.2	100

Из таблицы следует, что размер частиц более 2 мм не представляет особого интереса для получения дополнительного источника хрома. Во-первых, из-за низкого содержания данной фракции в отвале хвостов. Во-вторых, почти 65% этой фракции составляют силикатные горные породы.

Таблица 3

Минеральный состав хвостов до и после обогащения
(среднее значение по всем пробам), %.

Название	Хромит	Серпентин	Кальцит	Доломит	Кварц	Альбит	Магнетит	Актинолит	Сумма
сходные хвосты*	51.4	28	3.8	3.6	2.1	2.8	1.8	0.5	100
Тяжелая фракция	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
Легкая фракция	31.1	32.8	6.8	6.8	8.6	4.6	6.2	3.1	100

* - исходные пробы из отвала

Следующий этап, это операция обогащения фракции меньше 2 мм, с получением двух концентратов. Первый концентрат это зерна малой плотности, легкая фракция. Второй концентрат тяжелая фракция. Полученные концентраты были высушены и взвешены. Выход тяжелой фракции составил 67 %, легкой фракции 33%. Для определения качественных и количественных характеристик концентраты и исходные пробы хвостов, анализировались рентгенофазовым методом.

Анализ показал изменения минерального состава хвостов, до и после обогащения. Данные полученные при рентгенофазовом анализе, также усреднены и представлены в таблице 3. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что при обогащении, увеличивается количество содержания хромита и уменьшается количество примесей. Данные рентгенофлуоресцентного анализа, также подтверждают то, что продукт значительно улучшает свои полезные характеристики (таблица 4).

Таблица 4

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа
(среднее значение по всем пробам), масс.%

Sample	MgO	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	SO ₃	ППП**	Сумма
Исходные хвосты*	13.72	3.81	0.73	0.62	31.43	23.81	18.24	0.16	0.07	1.34	101.2
Тяжелая фракция	12.9	1.51	0.33	0.64	43.01	25.08	19.49	0.17	0.06	0.45	101.8
Легкая фракция	24.21	34.64	5.74	0.54	10.32	8.24	5.28	0.25	0.08	11.96	102.1

* - исходные пробы из отвала

Исследования концентратов обогащения показали, что процент извлечения в тяжелой фракции составил 79% (табл.5), что является очень хорошим результатом. Результат позволяет использовать легкую фракцию как исходный материал для извлечения платиноидов. Ниже будет показано, что платиноиды связаны именно с алюмосиликатной составляющей хромитовых руд и в частности хвостов обогащения.

Таблица 5

Результаты обогащения

Хвосты предприятия	Вес, кг	Содержание Cr ₂ O ₃ масс. %	Кол-во Cr ₂ O ₃ , кг	% извлечения
Тяжелая фракция	30	43.01	12.7	79.0
Легкая фракция	21	10.3	2.1	21.0

Дополнительные эксперименты по обогащению на магнитном и электромагнитном сепараторах, не дали эффекта и признаны не эффективными.

Минералого-геохимические исследования Ю.А. Волченко с соавторами [1], позволили оценить средние содержания элементов платиновой группы (ЭПГ) в западном (ЗРТ), центральном (ЦРТ) и восточном (ВРТ) рудных телах (мг/т, соответственно): Os – 108, 110, 88; Ir – 140, 117, 50; Ru – 100, 110, 82; Rh – 8, 22, 10; Pt – 50, 70, 40; Pd – 6, 3, 10. Ими установлено наличие во всех рудных телах минералов платиновых металлов (МПМ) ряда лаурит RuS₂ – эрликманит OsS₂ в виде идиоморфных зерен размером 5-50 мкм, а также бреггит (Pt,Ni)S – высоцит (Pd,Ni)S в виде тонких включений (1-10 мкм) в хромшпинелидах ЦРТ. Установлена также тенденция к увеличению содержания Os,

Rh и Pd вверх по разрезу. Несмотря на установленный ими комплексный характер руд, в отношении извлечения благородных металлов был дан отрицательный прогноз. Это связано с отсутствием приемлемой технологии извлечения МПГ и целевой направленности хромовых руд (производство огнеупоров).

Исследования полученных нами продуктов проведены методами электронной микроскопии, микрозондирования и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСПМС). Прецизионные исследования позволили определить количественное содержание благородных элементов методом ИСП-МС, а метод ЭМ помог получить микрофотографии минеральных форм и их химический состав.

Выводы исследований по распределению ЭПГ свидетельствуют о наличии содержащий ЭПГ в концентратах близких к промышленным значениям. Эти данные позволяют рекомендовать продолжение исследований. Дополнительным свидетельством в пользу этого направления является наличие связи платиновых минералов с силикатными горными породами. Т.е. дальнейшее направление исследований о возможности выделения ЭПГ должно базироваться на исследованиях по разделению хвостов на хромовую и силикатную составляющую и исследования собственно силикатной составляющей хромовой руды.

Для выявления принципиальной возможности извлечения МПГ и увеличения комплексности руд, изучалась форма нахождения и локализация МПГ в хвостах обогащения. Поскольку для МПМ характерен мелкий размер зерен (до 50 мкм), были отобраны хвосты обогащения крупностью менее 4 мм преимущественно хромшпинелид-серпентинового состава. На винтовом сепараторе обогащалась фракция < 2 мм до получения существенного хромшпинелидового концентрата (95-100%). Из него отсеивались классы 0,5-0,125 мм и < 0,125 мм, из которых (в бромформе) была выделена тяжелая фракция, которая изучалась на электронном микроскопе. Фракция 0,5-0,125 мм заливалась эпоксидной смолой в «шайбу», которая была дважды сошлифована на разную глубину зерен, а класс < 0,125 мм наносился в виде тонкого слоя непосредственно на углеродистый скотч. Исследование этих препаратов показало наличие платиноидов только во фракции < 0,125 мм. Встреченные МПМ (рис. 2, табл. 6) представлены лауритом (8 зерен) и эрликманитом (1 зерно).

Таблица 6

Состав минералов платиновых металлов, масс.%

Element	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S	33.51	37.48	35.35	32.94	31.52	36.63	36.74	35.25	25.81	27.34	30.46
Ni	0.00	0.18	0.22	0.00	0.00	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41
As	0.00	0.00	0.23	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	8.94	8.70
Ru	30.59	44.06	42.94	32.27	26.30	46.07	47.74	45.59	3.22	20.38	32.40
Os	21.79	11.14	16.36	28.45	27.73	10.45	7.38	14.99	49.07	13.58	10.77
Ir	14.10	7.13	4.89	6.33	14.21	6.41	8.15	4.17	21.89	29.76	17.27
Σ	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Примечание. В столбцах отражены средние составы (из 2 анализов): 1-8 – лаурит, 9 – эрликманит, 10 и 11 – ириситовая пленка на зернах лаурита № 1 и № 3 соответственно

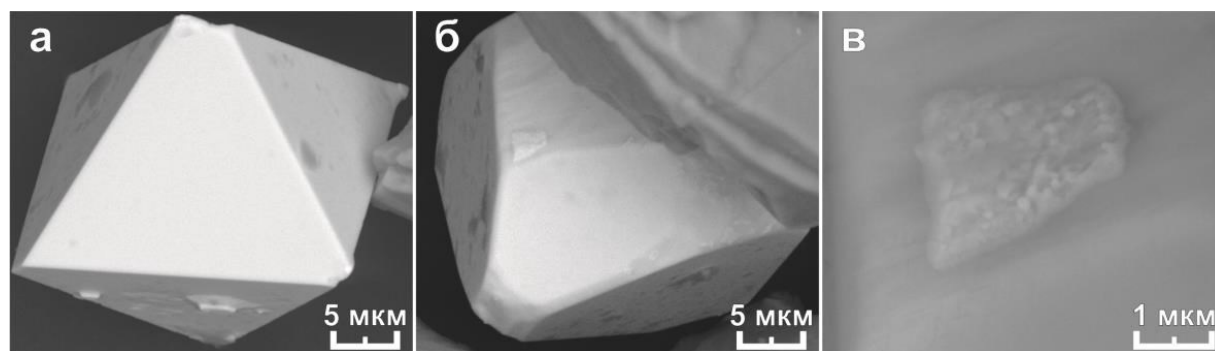


Рис. 2. Os-Ru сульфиды (BSE): а, б – кристаллы лаурита различной формы; в – фрагмент пленки ирарситового состава на лаурите (б)

На двух зернах лаурита зафиксированы фрагменты пленок ирарситового состава (IrAsS). Все находки представлены изолированными зернами, а в качестве сростков с другими минералами или включений в зернах хромшпинелида не встречаются. По данным масс-спектрометрии (ИГГУрО РАН), в хромовой руде центрального рудного тела (ЦРТ) были определены содержания элементов платиновой группы (таблица 7).

Таблица 7

Содержание Элементов ПГ в руде ЦРТ, г/т

Элемент	Хромит	Хромит	Хромит	Хромит
Re	0.002	0.000	0.005	0.001
Ir	0.023	0.016	0.021	0.022
Pt	0.003	0.003	0.002	0.003
Ru	0.322	0.224	0.086	0.023
Rh	0.039	0.030	0.012	0.008
Pd	0.162	0.218	0.122	0.047
Au	0.000	0.000	0.001	0.000
Сумма	0.551	0.491	0.249	0.103

Полученные из хвостов концентраты, были изучены методом ИСП-МС в лаборатории Сектора наноминералогии (ПГНИУ), с целью определения количественного содержания элементов платиновой группы (ЭПГ) и представлены в таблице ниже.

Таблица 8

Содержание ЭПГ в хвостах, г/т

	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au	сумма
1	0.30	0.00	0.77	0.42	0.09	0.06	0.23	1.87
2	0.05	0.00	0.73	0.06	0.03	0.08	0.14	1.10

1 - тяжелая фракция хвостов обогащенных на винтовом сепараторе,
2 – легкая фракция хвостов обогащенных на винтовом сепараторе.

Для оценки возможности использования хвостов обогащения хромитовых руд Сарановского месторождения в качестве дополнительного источника хрома и перспективы получения платиноидов, предложен комплекс аналитических методов и методика экспериментов по обогащению. Результаты исследований базировались на испытаниях 13 горстьевых проб весом по 30 кг каждая.

Результаты исследований показали, что хвосты являются относительно однородным объектом с преобладающим размером частиц меньше 2 мм. Результаты, полученные при определении минерального и химического составов проб, также подтверждают выводы об однородности минерального (рентгенофазовый анализ), гранулометрического (ситовой анализ) и химического (рентгенофлуорисцентный анализ) состава хвостов. Результаты экспериментального обогащения объединенной пробы (51 кг) на винтовом сепараторе приведены в таблице 5. Как видно из таблицы, процент извлечения полезного компонента равен 79 %, что является хорошим показателем. Основным выводом состоит в том, что хвосты обогащения хромитовых руд Сарановской Шахты «Рудная» на Главном Сарановском месторождении, являются дополнительным источником хрома.

Выводы исследований по распределению ЭПГ свидетельствуют о наличии содержания ЭПГ в концентратах, близких к промышленным. Эти данные позволяют рекомендовать продолжение исследований в этом направлении, используя в качестве исходного материала алюмосиликатную составляющую хвостов обогащения хромитовых руд. Несомненно, в дальнейших исследованиях следует использовать это открывшееся обстоятельство. Также, полученные результаты позволили внедрить на предприятии дополнительную технологическую линию по обогащению хвостов на винтовых сепараторах, с получением готового продукта в виде хромового концентрата фракции меньше 2 мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волченко Ю.А. Платина Урала. Избранные труды. – Екатеринбург, 2011. – Т. 2. – 401 с.
2. Вахромеев С.А., Зимин И.А., Кожевников К.Е., Ласьков А.Н., Мазаев Г.М. Уральские месторождения хромита. – М.; Л.: Онти, 1936. – 240 с.
3. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах: гос. докл. / М-во природных ресурсов и экологии Рос. Фед. – М., 2018. – 372 с. – Текст электронный // URL:
4. http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/2017_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (Дата обращения: 15.04.2019).
5. Зильберман А.М., Ибламинов Р.Г., Лебедев Г.В. О магматических формациях Западного склона Северного и Среднего Урала // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. / ПГУ. – Пермь, 2000. – С. 52-54. – (Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского; Вып.2).
6. Зимин И.А. Сарановское хромитоворудное месторождение // Труды Уральского научно-исследовательского института геологии, разведки и исследования минерального сырья. – Свердловск, 1938. – Т. 2. – С. 33-41.
7. Зимин И.А. О тектонике Сарановского хромитового месторождения // Труды Уральского научно-исследовательского института геологии, разведки и исследования минерального сырья. – Свердловск, 1937. – Т. 1. – С. 65-76.
8. Иванов О.К. Расслоенные хромитоносные ультрамафиты Урала. – М.: Наука, 1990. – 243 с.: ил.
9. Мягков В.Ф., Баталов В.Л. Методика опробования хромитов Сарановского месторождения / ПГУ. – Пермь, 1966. – 75 с.
10. Полькин С.И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 428 с.