

УДК 622.72 + 622.765

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ
БЕДНЫХ ШЕЕЛИТОВЫХ РУД**

**Е. Д. Шепета¹, Л. А. Саматова¹, И. В. Алушкин²,
В. Б. Щипчин², И. Г. Корнеев²**

¹*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: samatova_luiza@mail.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*
²*ЗАО Транс Текникк, 144006, г. Электросталь, Россия*

Рассмотрены результаты флотационных исследований продуктов рентгеноабсорбционной сепарации, которая позволяет в 4–5 раз повысить содержание WO_3 в питании последующего флотационного передела. Оценена возможность снижения выхода отсева исходной руды (несортируемый класс) – 6 + 0 мм и перспективность его гравитационного обогащения.

Забалансовая шеелитовая руда, обогащенный продукт сепарации, отсев (несортируемый класс) исходной руды – 6 + 0 мм, шихта

Отработка месторождений с низким содержанием основных компонентов в сложных горно-геологических условиях требует изменения традиционных подходов к добыче и обогащению полезных ископаемых. В целях повышения рентабельности часть горнодобывающих предприятий ведет селективную выемку руды, богатой по содержанию полезного компонента. Это приводит к образованию складов балансовых руд, некондиционных для традиционных технологических схем. С другой стороны, на ряде предприятий наблюдается тенденция применения высокопроизводительной горной техники и валовой системы разработки месторождений, что способствует значительному разубоживанию руды.

Экономическая эффективность дальнейшей переработки подобных руд методами глубокого обогащения снижается в силу того, что на подготовительные процессы поступает горная масса значительных объемов с низким содержанием полезного компонента, при этом на процессы дробления и измельчения приходится значительные затраты энергии. Обеспечить рентабельное освоение таких руд можно за счет увеличения содержания полезного компонента в товарной руде, поступающей на переработку.

Предварительное обогащение может быть достигнуто путем внедрения на предприятии низкочрезмерной и высокопроизводительной технологии покусковой сепарации руд после циклов крупного и среднего дробления. Данный подход позволит исключить из дальнейших процессов переработки часть пустой породы и одновременно повысить содержание полезного компонента в руде, направляемой на обогатительную фабрику.

Наибольшие перспективы в этом направлении имеют радиометрические методы сепарации (РМС) [1, 2]. Преимущества данной технологии заключаются в возможности обогащения руд в широком диапазоне крупности при низких капитальных и эксплуатационных затратах при соблюдении норм экологической безопасности. Применение технологий радиометрической се-

парации позволит выделить 80 % крупнокусковых хвостов на стадии дробления, повысить в концентрате долю легкообогатимых типов руд, содержание основных и попутных элементов, расширить общий объем забалансовых руд, вовлекаемых в переработку, увеличить продолжительность отработки месторождений.

В данной статье рассмотрены результаты исследований флотационных свойств исходной забалансовой шеелитовой пробы руды и продуктов ее сепарации XRT сепаратора TOMRA Sorting.

В сепараторе отсортировка кускового материала основана на различии в ослаблении потока первичного рентгеновского излучения кусками породы и руды. Преимущество рентгеновского излучения в том, что оно является проникающим и позволяет анализировать куски со скрытыми рудными минералами, не требуя специальной подготовки материала к сепарации (промывка, очистка поверхности) [3]. Схема работы сепаратора представлена на рис. 1.

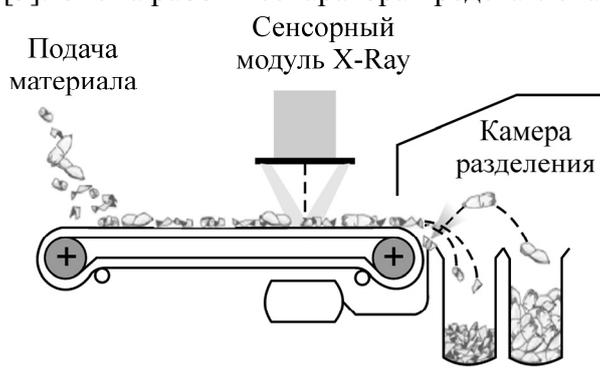


Рис. 1. Схема работы XRT сепаратора TOMRA Sorting

Оборудование компании TOMRA Sorting позволяет обогащать вольфрамовые руды в диапазоне крупности 6–50 мм. В зависимости от задач сепарации и крупности исходного питания максимальная производительность по исходному питанию на одном сепараторе с шириной ленты 1200 мм достигает 50 т/ч. На сепарацию рекомендуется подавать классифицированный по классам крупности материал с модулем крупности не более 3. Сепарация бедной шеелитовой руды проводилась по машинным классам –50 + 20, –20 + 12, –12 + 6 мм.

Исследования по рентгеноабсорбционной сепарации выполнены на окисленной пробе руды с исходным содержанием: WO_3 — 0.24 %, P — 0.15, Cu — 0.04, общая S — 0.73, сульфидная — 0.11, As — 0.14 %, Au — 0.14 г/т, Ag — 1.5 г/т. При переработке данной руды на обогатительной фабрике получен шеелитовый концентрат с содержанием WO_3 46.5 %, извлечение составило 45.6 %, при следующем распределении потерь, %: сульфидный цикл — 1.0, хвосты коллективного цикла флотации и доводки — 62, слив сгущения — 37, значительно возросли потери шеелита из основных флотационных классов. Потери из класса –160 + 15 мкм составили 28.7 %, в шламах тоньше 15 мкм — 22 % от руды.

Гранулометрическая характеристика исходного питания сепарации приведена в табл. 1. Класс –50 + 6 мм направлялся на сепарацию, –6 + 5 мм — отсеб (несортируемый класс исходной руды –6 + 0 мм).

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрическая характеристика исходной пробы питания сепарации

Класс крупности, мм	–50 + 20	–20 + 12	–12 + 6	–6 + 5	Итого
Выход, %	66.7	15.7	14.4	3.2	100
Содержание WO_3 , %	0.22	0.22	0.17	0.36	0.217
Распределение WO_3 , %	67.5	15.9	11.3	5.3	100

При изучении вещественного состава выявлена высокая контрастность материала исследуемой пробы руды [4]. На богатые шеелит-кварц-сульфидные руды приходится 10.9% с распределением шеелита около 79%. Разубоживающая порода представлена: гранодиоритами на 23%, кварцитами — 14.5, биотитами — 14, песчаниками — 11, известняками — 1%. Выход породы составляет 63.5% с содержанием WO_3 0.05% при извлечении шеелита 13.9%.

Согласно минералогическому составу, на шеелит приходится 0.2–0.3%, апатит — 0.5, кальцит — 2–3, сульфиды — 2.7–3.2, в том числе халькопирит — 0.2, арсенопирит — 0.5, пирротин — 2.0–2.5; кварц — 40–45, пироксены — 30–35, амфиболы — 2–3, биотит — 5–7, полево-шпат — 3–5, лимонит — 3–5%.

Технологические испытания по сепарации материала пробы проведены в соответствии с методическими рекомендациями [5, 6]. Схема исследований радиометрической сепарации включала этапы работ, отраженные на рис. 2.

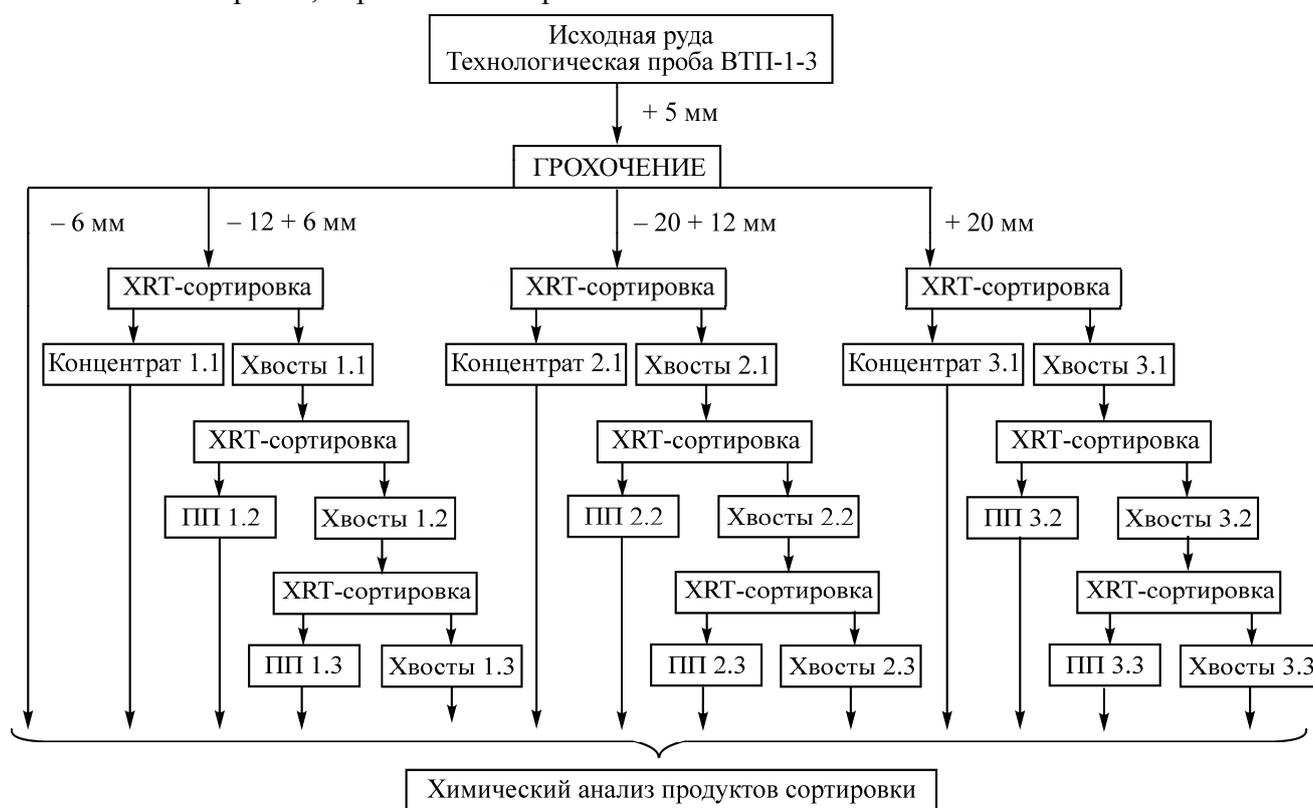


Рис. 2. Принципиальная схема проведения XRT-сепарации исследуемой руды (ПП — промышленный продукт)

Испытания выполнены в тестовом центре компании TOMRA Sorting (Германия) в режиме поточной сепарации на комплексной установке, состоящей из вибропитателя, ленточного конвейера подачи руды, промышленного сепаратора (COM Tertiary XRT). По заданным границам для каждого класса выделялись концентрат 1, промышленные продукты 2 и 3. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

В ходе сепарации окисленной забалансовой шеелитовой руды выделено 84% отвальных хвостов (хвосты + промышленный продукт 1) с содержанием WO_3 0.04% и потерями 15.1%. В обогащенный продукт, представленный концентратом сепарации и промышленным продуктом 2, выход которого около 16% от руды при содержании WO_3 1.12%, извлечение составляет 84.9%. Полученные данные имеют сходство с показателями зарубежной практики промышленного освоения сортировки бедных руд Австралии [7].

ТАБЛИЦА 2. Результаты сепарации шеелитовой руды технологической пробы ВТП-1-3 в поточном режиме

Класс крупности руды, мм	Продукт	Выход, %		Содержание WO ₃ , %	Извлечение WO ₃ , %	
		от класса крупности	от исходного		от класса крупности	от исходного
– 12 + 6	Хвосты	78.15	11.63	0.030	14.19	1.63
	Пром. продукт 1.3	9.03	1.34	0.070	3.83	0.44
	Пром. продукт 1.2	4.79	0.71	0.180	5.22	0.60
	Концентрат 1.1	8.03	1.19	1.580	76.76	8.81
	Итого:	100	14.88	0.165	100	11.48
– 20 + 12	Хвосты	78.10	12.66	0.080	28.77	4.73
	Пром. продукт 2.3	12.18	1.97	0.050	2.80	0.46
	Пром. продукт 2.2	3.89	0.63	0.250	4.48	0.74
	Концентрат 2.1	5.83	0.95	2.380	63.95	10.51
	Итого:	100	16.21	0.217	100	16.43
– 50 + 20	Хвосты	66.43	45.78	0.030	8.90	6.41
	Пром. продукт 3.3	15.16	10.45	0.030	2.03	1.46
	Пром. продукт 3.2	9.03	6.22	0.120	4.84	3.49
	Концентрат 3.1	9.39	6.47	2.010	84.24	60.72
	Итого:	100	68.92	0.224	100	72.09
Сводные показатели	Хвосты	—	70.06	0.039	—	12.77
	Пром. продукт 3	—	13.77	0.037	—	2.36
	Пром. продукт 2	—	7.56	0.136	—	4.82
	Концентрат 1	—	8.61	1.991	—	80.04
Итого по исходной руде (– 50 + 6):			—	100	0.214	100

Минералогическое изучение рудного материала в цепочке: концентрат сепарации 1 – промышленные продукты 2, 3 – хвосты, показало уменьшение доли богатой шеелит-кварцевой и шеелит-сульфидной руды. Отмечено снижение до затухания сульфидной минерализации пород, богатые кварцевые прожилки с размером кристаллов шеелита 1(2) – 5(7) мм сменяются редкими и единичными зернами шеелита крупностью 0.05 – 0.08 мм, породы становятся более массивными и монолитными без видимых прожилков.

На основании данных табл. 2 можно говорить о принципиальной возможности сепарации шеелитовой руды с использованием рентгеноабсорбционного метода для класса крупностью – 50 + 6 мм с получением высоких технологических показателей предварительного обогащения. Это объясняется высокой природной контрастностью материала исследуемых проб руды, а также эффективным разделением руды на рентгеноабсорбционном сепарационном оборудовании компании TOMRA Sorting.

В рамках исследований в данной работе выполнено сравнение флотационной активности основных кальциевых минералов на стадии флотационного передела [8]. В тестовом режиме оценена флотоактивность шеелита для обогащенных фракций руды после предварительной сепарации в сравнении с показателями обогащения стандартной руды и шихт, представленных обогащенной рудой и несортируемым классом исходной руды – 6 + 0 мм. Определены оптимальные условия флотации шеелита для водопроводной и технической воды [9]. Поставлена серия замкнутых опытов с анализом потерь основных элементов по классам крупности. Сводные результаты представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Сводные показатели обогащения продуктов сепарации, %

Продукт	Выход	Содержание		Извлечение	
		WO ₃	CaCO ₃	WO ₃	CaCO ₃
Шеелитовый концентрат	0.33	49.0	26.8	75.12	8.81
Черновой концентрат	8.60	2.07	19.46	83.06	38.27
Бедная шеелитовая руда	—	0.21	4.37	—	—
Шеелитовый концентрат	2.65	61.02	6.32	88.61	5.25
Черновой концентрат	18.51	9.51	8.20	96.36	47.48
Обогащенная руда 1	—	1.83	3.20	—	—
Шеелитовый концентрат	2.09	50.92	24.37	89.26	14.76
Черновой концентрат	14.23	7.98	12.64	95.26	52.13
Обогащенная руда 2	—	1.19	3.45	—	—
Шеелитовый концентрат	1.49	56.78	16.83	88.08	6.52
Черновой концентрат	13.39	7.16	10.04	94.81	36.25
Отсев – 6 + 0 мм + руда 2 (15 : 85 %)	—	1.01	3.71	—	—
Шеелитовый концентрат	1.18	54.87	18.44	83.38	6.04
Черновой концентрат	11.16	6.35	12.75	91.77	39.62
Отсев – 6 + 0 мм + руда 2 (44 : 56 %)	—	0.75	3.59	—	—

На обогащенной руде после XRT-сепарации получены устойчиво высокие показатели обогащения, извлечение шеелита в конечный концентрат составило 88.6 – 89.3 %. В исследованиях установлено, что отсев исходной руды – 6 + 0 мм может компоноваться в шихту при содержании по массе не более 15 – 20 %. Исходная ситовая характеристика данного продукта позволяет провести предварительное обогащение класса, используя гравитационные методы (отсадочная машина, концентрационный стол). На рис. 3 приведены показатели обогащения отсева – 6 + 0 мм на концентрационном столе.

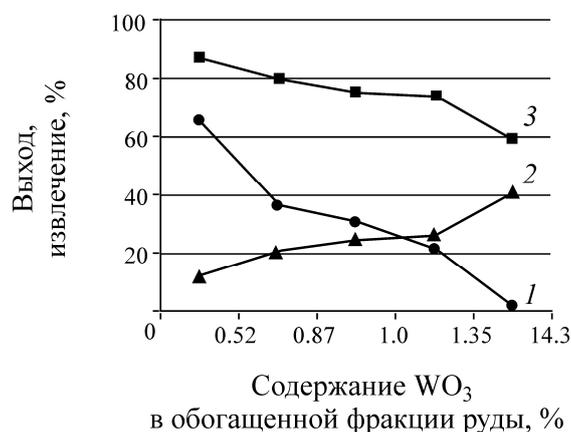


Рис. 3. Зависимости основных показателей обогащения от концентрации шеелита на гравитационном столе из отсева – 6 + 0 мм, %: 1 — выход концентрата; 2 — потери в хвостах; 3 — извлечение в концентрат

При выделении в хвосты до 70% горной массы из отсева – 6 + 0 мм на концентрационном столе в обогащенной руде достигается степень концентрации шеелита 2.6, содержание WO₃ 1%, извлечение 75.4%. При высокой степени концентрации шеелита порядка 37 (качество обогащенной руды 14.3%) потери ценного компонента резко возрастают и составляют 41%.

Отсев $-6+0$ мм, несмотря на его естественную степень концентрации по шеелиту, является узким местом рассматриваемой технологии предварительного обогащения вольфрамовых руд. Снижение выхода данного класса — актуальная задача, которая может быть частично решена за счет повышения крупности исходного материала. Сравнительные гранулометрические характеристики продуктов дробления для крупности $-50+0$ мм и $-70+0$ мм представлены на рис. 4. Повышение крупности питания до -70 мм позволяет в лабораторных условиях снизить выход отсева на 4 %, а распределение шеелита в данный класс на 6.9 %.

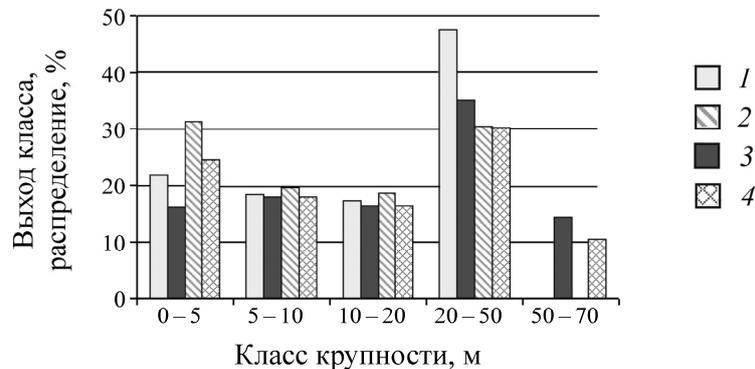


Рис. 4. Сравнительные гранулометрические характеристики продуктов дробления для исходной крупности $-50+0$ мм (1, 2) и $-70+0$ мм (3, 4): 1, 3 — выход классов; 2, 4 — распределение WO_3 по классам

На следующем этапе испытаний на оборудовании компании TOMRA Sorting будет изучена возможность сепарации шеелитовой руды текущей добычи крупностью -70 мм, где содержание класса $-70+50$ мм составит 28 %, что соответствует ситовой характеристике продукта разгрузки конусной дробилки среднего дробления.

ВЫВОДЫ

На основании результатов, полученных в ходе технологических испытаний рентгеноабсорбционной сепарации на первом этапе исследований и последующего флотационного тестирования продуктов сепарации бедной окисленной шеелитовой руды, установлено:

- рентгеноабсорбционная сепарация рудного шеелитового материала машинного класса крупности $-50+6$ мм на промышленном образце обеспечивает выделение 84 % отвальных хвостов ($WO_3 = 0.039\%$) с получением 16 % концентрата, в котором сосредоточено 84.9 % металла. Содержание WO_3 в обогащенном продукте составило 1.124 %, что в 5.25 раз выше, чем в исходной руде, подаваемой на поточную сепарацию;
- предварительная сепарация окисленной горной массы позволила в обогащенной руде (концентрат сепарации + пром. продукт 2) повысить содержание основных ценных компонентов и увеличить долю благоприятной к дальнейшему обогащению руды. Извлечение шеелита в конечный концентрат на стадии флотации составило 88.6–89.3 %, для исходной несортируемой руды 75 %;
- отсев исходной руды $-6+0$ мм является узким местом рассматриваемой технологии, повышение исходной крупности сепарации — путь снижения выхода данного класса и частичное решение проблемы. Предложены следующие пути решения по обогащению данного класса:
 - гравитационное обогащение до содержания триоксида вольфрама 0.8–1 % и затем введение в схему измельчения стандартной технологии;
 - совместная шихтовка с обогащенной рудой на шихтовальном дворе при соотношении 15(20) % к общей массе блока руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лизункин В. М., Царев С. А., Федоров Ю. О. Рентгенорадиометрическая сепарация — перспективное направление повышения эффективности разработки месторождений // Вестн. ЗабГУ. — 2009. — № 3.
2. Пестов В. В., Федоров Ю. О., Федоров М. Ю., Федоров А. Ю. Методические и технологические возможности РРС // Материалы Междунар. научн.-техн. конф. “Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья”. — Екатеринбург, 2008.
3. Алушкин И. В., Щипчин В. Б., Леонов В. Б., Шепета Е. Д., Саматова Л. А. Перспективы внедрения рентгеноабсорбционной сепарации вольфрамовых руд месторождения Восток-2 // Обогащение руд. — 2015. — № 1.
4. Саматова Л. А., Шепета Е. Д., Гвоздев В. И. Минералого-технологические особенности и обогащение бедных шеелитовых руд Приморья // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
5. Стандарт Российского геологического общества. Твердые негорючие полезные ископаемые. Технологические методы исследования минерального сырья. Радиометрические методы обогащения. СТО Рос. Гео 08-009-98. — М.: РосГео, 1998.
6. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых / Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации. — М., 1993.
7. Andy Haslam. Developments in the tungsten industry, Australia, 21 ITIA Annual General Meeting Xiamen China, 2008.
8. Шепета Е. Д., Саматова Л. А., Кондратьев С. А. Кинетика флотации кальциевых минералов из шеелит-карбонатных руд // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
9. Шепета Е. Д. Разработка метода селективной десорбции собирателей с поверхности кальциевых минералов и технологии флотации тонкозернистой фракции шеелита из вольфрамовых руд месторождения “Восток-2”: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1987.

Поступила в редакцию 16/XI 2015