

Создание гидрогеологической модели в режиме 3D позволит:

- оптимизировать объем добычи и режим эксплуатации подземных вод;
- выявлять перспективные участки для постановки поисково-оценочных и разведочных работ;
- оценивать и прогнозировать качество подземных вод при необходимости увеличения эксплуатационной нагрузки на водоносный горизонт;
- определять возможность удовлетворения объемов, заявленных недропользователями добычи подземных вод при оформлении лицензий;
- решать другие оценочные и прогнозные гидрогеологические задачи;
- осуществлять управление ресурсной базой подземных вод и целевым назначением их использования, не допуская ухудшения качества вод.

Объемы и площади работ могут быть скорректированы при составлении программы работ в соответствии с требованиями ЦКР Роснедр к качеству 3D геолого-гидродинамической модели.

Необходимо предотвратить процесс усиления засоления грунтовых вод, существующий на территории Саранского промузла и не допустить его распространения на другие водозаборы, что может сделать этот процесс необратимым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров, И.А. Отчет о детальной разведке подземных вод в районе г. Саранска Мордовской АССР / И.А. Бочаров, И.Ф. Погребняк, Г.Г. Сафронов, 1964.

2. Володина, Т.В. Отчет о результатах работ по осуществлению контроля за охраной подземных вод от истощения и загрязнения на территории Мордовской АССР, выполненных гидрогеологической режимной партией в 1984–1985 гг. / Т.В. Володина, Н.Е. Сафонова, 1986.

3. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Республики Мордовия за 2015 г. — Вып. 20. / Т.В. Володина — Саранск, 2016.

4. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды на территории Республики Мордовия за 2004 г. — Вып. 9. — Саранск, 2005.

5. Порунов, С.К. Отчет о разведке подземных вод на Сивинском и Вертилимском участках и анализ работы действующих водозаборов г. Саранска, выполненных Мордовской геологопоисковой партией в 1982–1987 гг. / С.К. Порунов, Л.Г. Соломко, В.С. Плотников, 1987.

6. Пояснительная записка к геологической карте четвертичных отложений Республики Мордовия / Н.В. Буцацкая, С.П. Евдокимова, В.Н. Маскайкин, 1998.

7. Разработка математической гидрогеологической модели Саранского промузла с целью ее использования для управления ресурсной базой питьевых и технических подземных вод и оценка их ресурсного потенциала / В.В. Дикарев, 2019.

8. Схематическая гидрохимическая карта водоносного карбонатно-угольнопермского карбонатного горизонта по территории Республики Мордовия масштаб 1:200 000 / Н.Е. Сафонова, Т.В. Володина, 1999.

9. Фисунов, А.Д. Дополнение к отчету о гидрогеологических исследованиях в районе г. Саранска для водоснабжения Саранского промышленного района Мордовской АССР (подсчет запасов) / А.Д. Фисунов, 1961 г.

10. Шпагина, О.Н. Отчет о результатах работ по объекту: «Государственный мониторинг состояния недр территории Приволжского федерального округа в 2016 году» / О.Н. Шпагина, 2016.

© Живайкина В.В., 2021

Живайкина Валентина Викторовна // irina.mansurova1@gmail.com

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.725

Петров С.В. (СПбГУ), Бороздин А.П. (ООО «ЛИМС»), Головина Т.А. (ОАО «Полиметалл УК»), Шелухина Ю.С. (СПбГУ, ООО «ЛИМС»)

ОБ ОПЫТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ РУДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СЕНСОРНЫХ МЕТОДИК

В статье приводится обзор применения современных способов предварительной сепарации различных руд с применением сенсорных методик и, прежде всего, рентгеноабсорбционной (рентгенотрансмиссионной) сепарации (XRT). Кратко приведены физическая сущность метода, ограничения, области применения, выполнено сравнение технологии XRT с другими методами предварительной концентрации. Кроме того, приведены многочисленные примеры применения методики XRT сепарации

и сортировки на различных типах руд. **Ключевые слова:** предварительная сепарация, XRT, рентгенотрансмиссионная сепарация, сортировка.

Petrov S.V. (SPSU), Borozdin A.P. (LIMS), Golovina T.A. (Polymetal), Shelukhina Yu.S. (SPSU, LIMS)

EXPERIENCE OF APPLICATION OF ORE PRE-CONCENTRATION WITH THE IMPLEMENTATION OF MODERN SENSOR TECHNIQUES

The article provides an overview of the application of modern methods of preliminary concentration of various ore types using sensor techniques and, above all, X-ray absorption (X-ray transmission) sorting (XRT). The physics of the method, limitations, and areas of application are presented. The XRT technology is compared with other methods of preliminary concentration. In addition, numerous examples of the application of the XRT concentration and sorting technique to various types of ores are given. **Keywords:** pre-concentration, XRT, X-ray transmission sorting.

Введение

Предварительная сепарация руд представляет собой процесс удаления отдельных кусков пустых пород и убогих некондиционных руд из крупнодробленой горной массы¹. Целью применения методов предварительной сепарации является получение обогащенного продукта, который направляется на обогащение и крупнокускового материала с отвальными концентрациями полезных компонентов.

Применение предварительной сепарации приводит к уменьшению объема руды для мелкого дробления и измельчения, что приводит к снижению общих эксплуатационных затрат на обогащение. Уменьшенный объем перерабатываемого материала позволяет использовать более компактное оборудование, следовательно, уменьшаются размеры обогатительной фабрики, что приводит к выигрышу и в капитальных затратах. Из-за заметного улучшения качества сепарированной руды наблюдается эффект повышения извлечения полезных компонентов в основных обогатительных процессах, что часто приводит к повышению сквозного извлечения [10].

С другой стороны, низкая себестоимость процесса сепарации может привести к вовлечению в переработку бедных руд (или пересчет контура балансовых руд из-за снижения бортового содержания), а следовательно, и к увеличению производительности горного предприятия, срока эксплуатации рудника и чистого дисконтированного дохода [20].

В России разработки различных методик предварительной сепарации имеют давнюю историю, некоторые труды приведены в библиографии [2–8]. В настоящее время применяется большое количество методик предварительной сепарации, основанных на физико-механических характеристиках руды:

- плотности (отсадка, тяжелосреднее обогащение углей, алмазного, хромитового, баритового и других видов сырья);
- магнитной восприимчивости (сухая магнитная сепарация дробленой железной руды и др.);
- по форме частиц (обогащение асбеста, слюд и пр.);
- по размеру частиц (промывка и другие операции классификации сырья);
- использование объемных эффектов при фазовых переходах и декрипитации (обогащение сподумена) и т.д.

Наконец, существует огромное количество методов предварительной сепарации, основанной на ре-

Таблица 1
Типы сенсоров для сортировки руды

Тип излучения	Длина волны, м	Тип сенсора	Распознаваемое свойство руды
Гамма-излучение	10^{-12}	Радиометрический	Естественное гамма-излучение
	10^{-11}		
	10^{-10}		
Рентгеновское излучение	10^{-9}	Рентгенографический/ Рентгенофлуоресцентный	Атомная плотность/ Видимая флуоресценция
	10^{-8}		
Ультрафиолетовое излучение	10^{-7}	Камера для цветной съемки, фотометрический	Отражающая способность, яркость, люминесценция, прозрачность, форма/ Монохромное отражение/абсорбция
Видимое излучение	10^{-6}		
Ближний инфракрасный диапазон	10^{-5}	Ближний инфракрасный спектрометр	Отражение/абсорбция
	10^{-4}		
Инфракрасное излучение	10^{-3}	Инфракрасная камера	Термоэлектрическая проводимость, рассеивание тепла
Микроволновое излучение	10^{-2}		
		10^{-1}	Микроволновый инфракрасный
Радиоволновое излучение	10^1-10^2	—	
Переменный ток	10^3-10^4	Электромагнитный Проводимость	

гистрации различных спектральных характеристик руды (табл. 1 — с использованием [3, 8, 20]). Эти методы вместе называют спектральными или сенсорными (sensor-based sorting).

В последнее время все больше внимания уделяется спектральным методам сортировки и, особенно, XRT-сортировки, которая позиционируется как некий универсальный метод предварительной сортировки и концентрации руды. На горнодобывающую промышленность приходится 2–3 % мирового энергопотребления. Производители оборудования указывают, что сенсорные сортировочные установки способны снизить энергопотребление на 15 %, а также сократить расход воды на 3–4 м³ на каждую тонну руды. Именно этот метод сортировки руд мы постараемся всесторонне обсудить в настоящей публикации.

Мировыми центрами производства сортировочного сенсорного оборудования являются немецкие фирмы TOMRA² и STEINERT³. Здесь изготавливают сортировочные аппараты для пищевой промышленности, переработки вторичных материалов и горнорудной промышленности, основанные на применении различных типов сенсоров.

Компания DebTech (подразделение De Beers) разработала сортировочный комплекс XRT Coarse

¹ Видео <https://www.youtube.com/watch?v=Z5vxJIHFc2U>

² <https://www.tomra.com/ru-ru/sorting/mining..>

³ <https://steinertglobal.com/mining/>

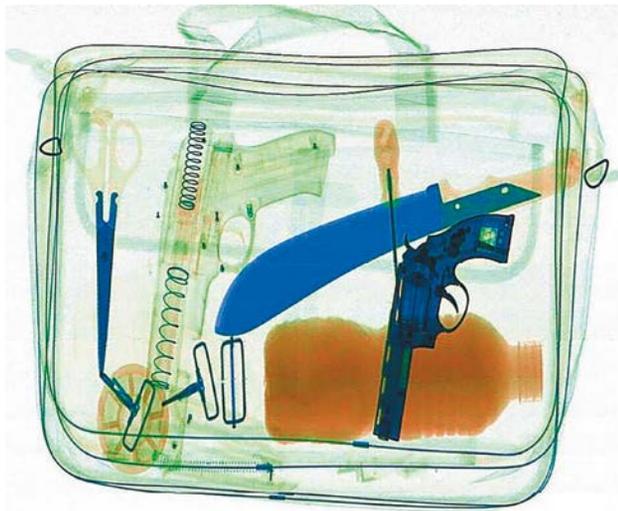


Рис. 1. Изображение внутреннего содержимого чемодана пассажира в багажном рентгеновском сканере в аэропорту. Фото с сайта <https://class-tour.com/>

Concentrator Plus (CC+)⁴. Российская компания НПО «Буревестник» (группа «Алроса») выпускает рентгенографический сепаратор РГС-2, который предназначен для обогащения алмазосодержащего материала классов крупности $-6+3$ мм в алмазодобывающей промышленности при производительности 1,2 т/ч⁵. Трансмиссионный сепаратор РГС-ОД-3 предназначен для окончательной доводки сухих алмазосодержащих концентратов крупностью $-3+1$ мм.

В Китае промышленные сепараторы выпускает фирма Ganzhou HPY Technology Co., Ltd⁶. В рамках европейского проекта X-MINE⁷ EU компания Comex⁸ совместно Advacam выпущены рентгеновские сортировочные установки CXR разной производительностью.

Что такое XRT?

Рентгеноабсорбционный метод (рентготрансмиссионный, XRT или X-Ray transmission) основан на различии в ослаблении потока рентгеновского излучения кусками породы и руды. Из-за различий в химическом составе минералов получается контрастное изображение, которое поддается обработке и содержательной интерпретации путем анализа распределения атомной плотности в кусках руды. В общем виде можно представить, что чем выше атомный номер элементов, входящих в состав минералов и горных пород, тем меньшее количество рентгеновских лучей

пройдет сквозь данный материал. Рентгеноабсорбционный метод является проникающим и позволяет сканировать руду со скрытой минерализацией. Этот метод достаточно универсален и применяется при обогащении самых разнообразных руд металлов, в том числе редких металлов, золота, а также алмазов и углей.

Прямым аналогом метода является всем хорошо знакомый багажный сканер («телевизор») в аэропортах. С помощью рентгеновской томографии багажа можно разобраться с тем, что находится в нем, не открывая его. Различные материалы поглощают рентгеновское излучение по-разному, поэтому есть возможность судить не только о форме, но и о химическом составе предметов в багаже (рис. 1). Именно эта технология перекочевала в различные отрасли промышленности — пищевую, машиностроение, в переработку мусора и, наконец, добралась до горной отрасли.

Принцип работы XRT сепаратора

Принцип работы XRT сепаратора рассмотрим на примере оборудования компании TOMRA Sorting GmbH, которая является лидером по разработкам и внедрению подобной аппаратуры в мире [1].

Современные XRT позволяют проводить покусковое обогащение руд в широком диапазоне крупности 8–120 мм. В зависимости от задач сепарации и крупности исходного питания максимальная производительность по исходному питанию на одном сепараторе может достигать 150 т/ч. На сепарацию рекомендуется подавать классифицированный по классам крупности материал с модулем крупности не более 3.

Исходный материал вибропитателем подается на транспортный узел сепаратора (транспортная лента или наклонный лоток), затем материал по транспортеру подается в зону облучения и регистрации (рис. 2). Получаемые при этом рентгенограммы кусков обрабатываются по специальному алгоритму (рис. 3). Полученные данные переводятся в графический вид и анализируются ЭВМ сепаратора. На следующем этапе ЭВМ принимает решение о выделении каждого в отдельности куска из общего потока с помощью

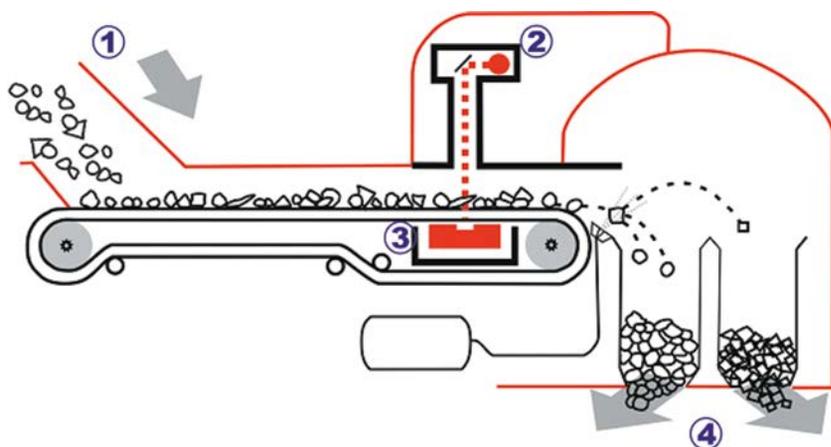


Рис. 2. Схема работы сепаратора TOMRA Sorting GmbH. Цифры на схеме: 1 — подача исходного материала, 2 — источник рентгеновского излучения, 3 — рентгеновская камера, 4 — разделительная камера. Изображение с сайта <http://thrane.ru/>

⁴ <http://www.debtech.com/product-XRT-plus.html>

⁵ <https://www.bourestnik.ru/products/sorters/x-ray-transmission-sorters/>

⁶ ykl@18hpy.com, No.3, manifen Road, Ganzhou Development Zone

⁷ <http://www.xmine.eu/wp-content/uploads/2018/11/Presentation-X-Mine-project-introductory-slides.pdf>

⁸ <http://www.comex-group.com/>

пневматических форсунок. Современные пневматические системы могут работать со скоростью до 2000 кусков руды в сек.

Рентгеноабсорбционный метод является проникающим и позволяет определять куски со скрытыми рудными минералами, поэтому особой подготовки материала к сепарации (промывка, очистка поверхности) не требуется. Для оптимизации условий измерения кусков различной крупности и снижения влияния плотности материала на уровень сигнала, TOMRA Sorting использует два различных приемника излучения: с каналом низкой энергии и с каналом высокой энергии (такие аппараты называются двухканальными). ЭВМ сепаратора совмещает рентгенограммы кусков, обрабатывает, в результате чего определяются материалы с разными атомными плотностями (рис. 3).

Установки рентгеноабсорбционного типа довольно легко сочетаются с другими сенсорными блоками, работающими на похожих (спектральных) принципах — измерение магнитных полей, проводимости, индукции, цвета (фотометрия), оптических характеристик (рассеивание лазерного луча, коэффициентов отражения и поглощения, люминесценция и пр.), регистрация поглощения и отражения инфракрасного излучения, вторичного рентгеновского излучения (XRF) и т.д. Имеется возможность объединения параметров разделения для повышения эффективности процесса.

Сравнение технологии XRT с другими методами предварительной концентрации

Весьма наглядное сравнение сенсорной технологии радиометрического обогащения (XRT) с традиционными и широко применяемыми методами гравитационной сепарации углей — отсадкой (JIG) и

Таблица 2

Сравнение методов сортировки угля (по И.В. Алушкину с соавт. [1])

Параметры	XRT	DMS	JIG
Производительность, т/ч	250	200	700
Коэффициент загрузки оборудования, %	85	75	75
Мощность, кВт	364	1760	3500
Срок службы, лет	10	10	10
Техническое обслуживание (% от капитальных затрат)	10	5	5
Капитальные затраты, €/т	0,16	0,89	0,19
Эксплуатационные затраты, €/т	0,28	1,11	0,45

Примечание: DMS — тяжелосреднее обогащение, JIG — отсадка

тяжелосредней сепарацией (DMS) приведен в статье И.В. Алушкина с соавторами (табл. 2) [1].

Стоит отметить, что основной статьей затрат на производство 1 т готовой продукции XRT-методом является техническое обслуживание оборудования, тогда как в традиционных методах основные затраты идут на электроэнергию, повышая себестоимость продукции. В этой связи быстро развивающиеся технологии радиометрического обогащения в силу своих преимуществ вызывают широкий интерес недропользователей во всем мире (табл. 3).

Примеры применения методики XRT сортировки различных руд

Снижение нагрузки на мельницы — экономия электроэнергии

Наиболее ранний анализ экономической эффективности новых методов сенсорной сепарации приведен Н.Р. Manouchehri [18]. Здесь впервые приводятся оценки себестоимости предварительного обогащения сенсорными методами (рис. 4).

G.R. Ballantyne, e.a. [10] исследовали чистую экономию энергии, достижимую для ряда сценариев сортировки XRT на основе руд с различной степенью измельчения.

J. Lessard, e.a. [16] оценили энергосбережение, реализованное в схеме измельчения, благодаря использованию сортировщика XRT с двойной энергией. В следующем трактате J. Lessard, e.a. [17] заполнили пробел в знаниях горнодобывающей промышленности, именно, отсутствие широкого понимания того, как могут быть внедрены сортировщики руды, и в чем их значительный экономический эффект. Они пришли к выводу, что этот

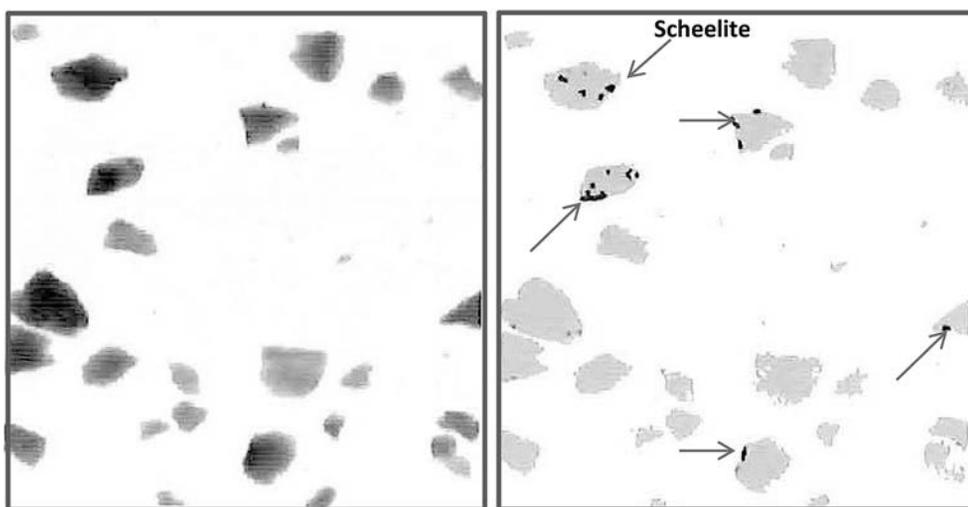


Рис. 3. Линейное сканирование изображений кусков, содержащих вольфрамовые минералы (слева); справа: то же изображение, обработанное с применением контрастных фильтров, позволяющих зафиксировать различную атомную плотность материала кусков. На отфильтрованных изображениях кусков отчетливо видны выделения шеелита. Вольфрамовый рудник Миттерзиль (Австрия) по М.Р. Роббену (Robben M. R., e.a., [24])

Таблица 3

Сравнение распространенных сенсорных методик с традиционными способами гравитационной сепарации руд и углей

	XRT	XRF (PPM)	DMS	JIG
Размер кусков, мм	10(15)–150	10–200	5–300	1–50
Позитивы	Сухой процесс		Минимальные технологические риски	
	Компактность, мобильные установки		Широкая практика применения	
	Возможность применения мобильной установки прямо на руднике		Высокая эффективность разделения материалов с близкими плотностями	
	Низкие капитальные затраты		Высокая производительность	Низкие эксплуатационные затраты, очень высокая производительность
	Низкое потребление энергии			Не требует специальной подготовки материала кроме классификации
Не требует специальной подготовки материала кроме классификации				
Негативы	Небольшое количество внедрений по миру и РФ		Высокая энергоемкость	
		Требует подготовки поверхности кусков (промывка, удаление шламов)	Высокий расход воды	
		Метод чувствителен к характеристикам распределения рудных минералов в кусках (текстурно-структурные особенности)	Большие капитальные затраты	

Примечание: XRF — рентгенорадиометрический (флуоресцентный) метод, PPM сепарация

пробел в знаниях является серьезным препятствием для широкого распространения рентгеноабсорбционного метода в горнодобывающей промышленности. В том же документе авторы представили анализ экономических и финансовых выгод от внедрения сортировщика руды XRT в контуры циркуляции гальки в мельницах самоизмельчения (SAG) на одном из

медных рудников США. Сортировщик XRT может сортировать и отбраковывать значительную составляющую циркуляционной нагрузки в контуре SAG, высвобождая тем самым мощность для измельчения, что позволяет расширить производительность рудоподготовки. Авторы количественно оценили прогнозируемое снижение удельных эксплуатационных расходов, увеличение прибыли и сроков окупаемости капитала на основе ряда сценариев сортировки.

Применение XRT сортировки гальки циркуляционной нагрузки мельниц самоизмельчения на крупном медно-порфировом предприятии (производительность 1500 т/ч) позволяет удалять из галечного контура до 150–180 т/ч в виде безрудных отходов и только 120–150 т/ч отправлять на дробление. Удельные расходы на сортировку составили 0,12–0,13 долл. США/т. В результате этой манипуляции дополнительная годовая прибыль (за счет дополнительной меди в товарной продукции и снижения энергозатрат) составляет около 7 млн долл. США.

Von Ketelhodt (Steinert US Inc) [12] и Parry (OreSort Solutions) в своем докладе на Colombia Gold Symposium 2018 привели несколько типовых сценариев применения XRT методов сортировки, которые основаны на реальных объектах⁹.

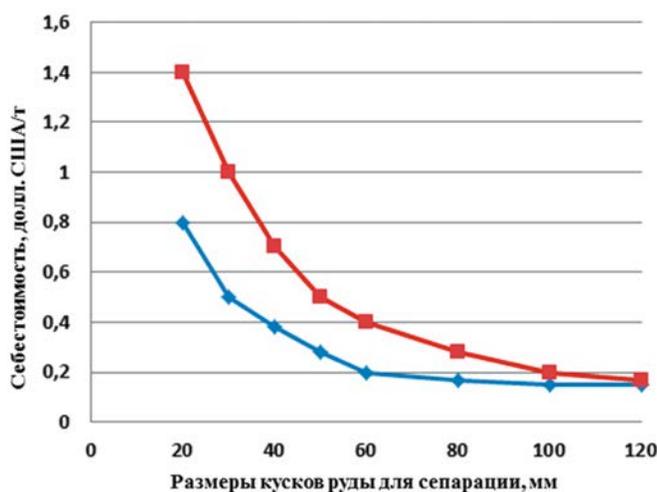


Рис. 4. Граничные значения себестоимости сенсорного обогащения для разных гранулометрических классов сепарации: минимальная — синяя кривая, максимальная — красная. По Н.Р. Manouchehri [18]

⁹ <https://colombiagold.co/memorias/2018/day2/SteinertL%C3%BCtkevonKetelhodt.pdf>

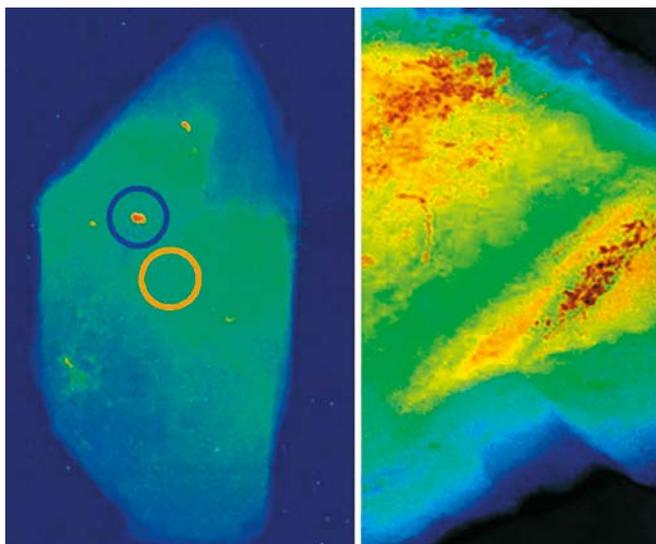


Рис. 6. Частицы высокой плотности (красного цвета), такие как золото, могут быть идентифицированы среди частиц средней плотности (желтого цвета), таких как железные или медные сульфиды, и оба типа материалов могут отличаться от обычных породообразующих силикатов низкой плотности (синяя). По J. Kolacz [15]

верхности частицы и ее внутренней структуре. Все эти сложные функции анализа требуют большой вычислительной мощности и должны быть оптимизированы для обеспечения высокой производительности сортировки. Это достигается с помощью специальной программной архитектуры и алгоритмических решений, позволяющих эффективно управлять процедурами расчета и приоритетами сортировки. В результате достигается очень высокая сепарационная способность и значительная эффективность, чистота продукта может достигать даже 99,9 %.

Новая система сортировки была разработана совместно Comex, Advacam и X-MINE в связи с проектом X-MINE EU. Новые датчики, разработанные в проекте X-MINE, включают в себя очень сложные технологии, включающие XRT высокого разрешения, систему коллиматоров и трехмерную визуализацию. Одновременно с просвечиванием образца на новом приборе имеется возможность регистрации флюоресценции на детекторе XRF, что позволяет проводить спектральный элементный анализ. Наконец, 3D-камера предо-

ставляет информацию о топографической структуре частиц. Сигналы от датчиков имеют очень сложную форму и содержат огромное количество информации о каждом анализируемом пикселе. Для этого требуются вычислительные системы на базе GPU с терафлопом для анализа изображений и обеспечения цифрового разделения частиц. Вся последовательность вычислений завершается в течение очень ограниченного короткого периода времени, обычно это 5–10 мс.

Применение новой системы XRT позволяет проводить очень сложный анализ, поскольку на изображениях можно выявлять включения высокоплотных минералов малого размера. Частицы размером менее 400 мкм никогда не будут регистрироваться традиционными детекторами. Новый датчик способен производить количественную и материальную дифференциацию в микрометровом диапазоне (рис. 6). Это позволяет напрямую идентифицировать рудные минералы в распространенных типах руд, таких как золото, медь, цинк, свинец, вольфрам, хром, железо и т.д.

Рентгеновская сортировочная установка CXR-1000 с шириной ленты 1 м и новыми датчиками XRT была использована для испытаний медной руды. В исходный материал подавалась медная руда низкого качества, где среднее содержание металла варьировало в отдельных кусках от 0 до 2 %. Данный тип руды совершенно невозможно было отсортировать с помощью стандартных детекторов XRT-DE. Однако с помощью новых датчиков XRT можно обнаружить области с низким тонковкрапленным содержанием меди (рис. 7). Из руды со средним содержанием меди 1,35 % выделено 2/3 концентрата с содержанием 1,99 % Cu при извлечении более 99,5 %. Содержание в отвальном продукте (выход — одна третья часть) составило 0,01 %.

Алмазная отрасль — яркий пример получения дополнительной прибыли за счет XRT сепарации.

Одной из главных проблем обогащения алмазного сырья является сохранность ювелирных камней в крупных классах кимберлита. Для решения этой проблемы последние 5–7 лет активно применяется метод выявления этих уникальных алмазов в крупнодробленной руде. Практически весь поток кимберлита крупностью кусков 100–200 мм проверяется на наличие алмазов методом XRT.

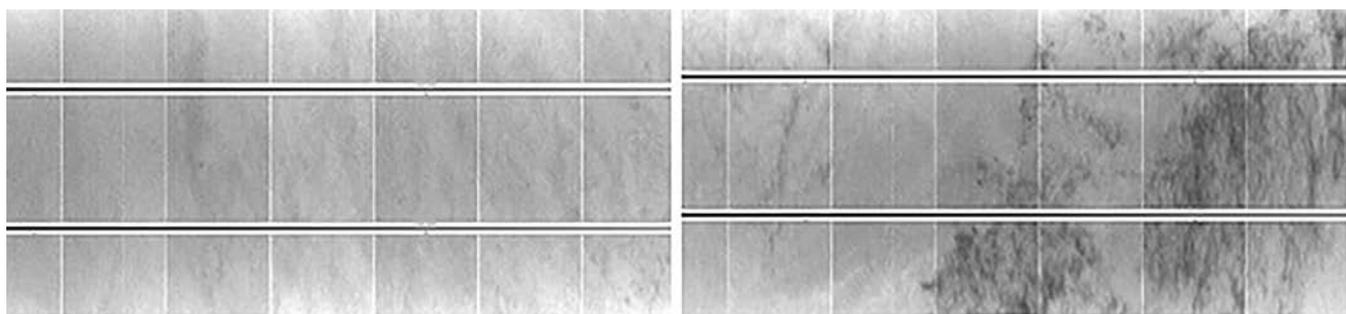


Рис. 7. Результат работы нового датчика, улавливающий даже небольшой контраст между фракцией отходов (слева) и рассеянной медной минерализацией (справа). По J. Kolacz [15]

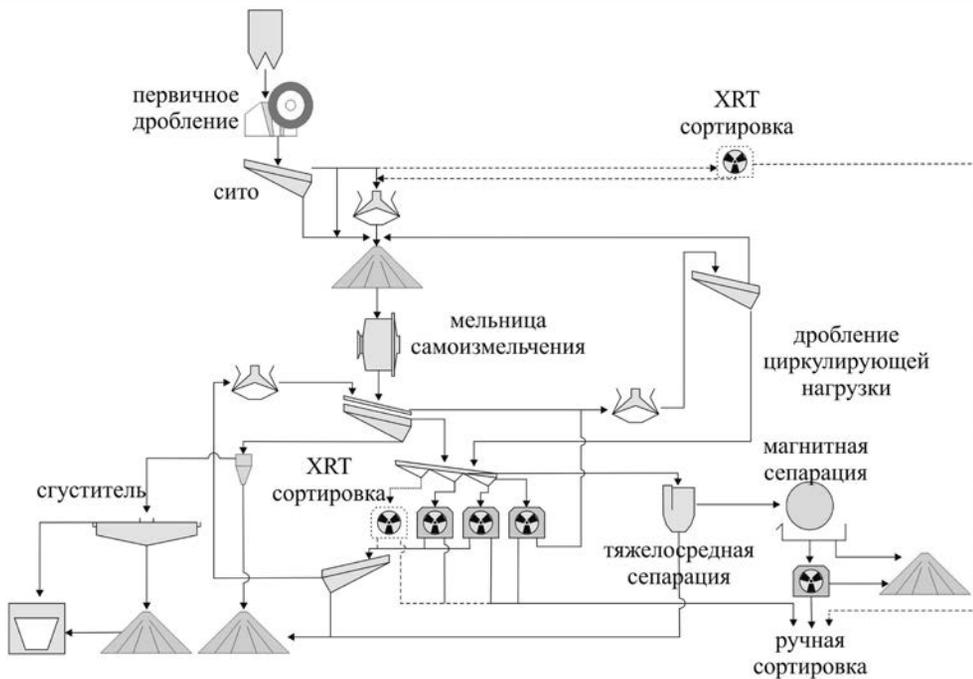


Рис. 8. Технологическая схема извлечения алмазов на руднике Карове (Ботсвана, Lucara Diamond Corp.)

Успехи не заставили ждать, на многих предприятиях сразу после установки этих сортировщиков были установлены рекорды по размерам извлеченного алмазного сырья. Наиболее ярким примером может служить опыт компании Lucara Diamond Corp.

После установки в 2015 г. на руднике Karowe технологии MDR (Mega Diamond Recovery) с применением сепараторов XRT (рис. 8, 9), позволяющей на ранней стадии обнаруживать крупные алмазы, избегая их возможного раскола в процессе дробления, в Ботсване на нем был найден ряд выдающихся алмазов, включая самый дорогой алмаз в мире Constellation (Созвездие) и второй крупнейший ювелирный алмаз в мировой истории Lesedi la Rona (Наш свет) (рис. 9).

С момента ввода ее в эксплуатацию в 2015 г. на руднике Karowe было добыто 12 алмазов весом свыше 300 карат, в том числе и два алмаза весом более 1000 карат каждый. Из 12 алмазов весом свыше 300 карат половина была наивысшего качества, а суммарные доходы от продажи 11 из этих алмазов составили 158 млн долл. США. Данные по 2019 г. тоже впечатляющие, на руднике было добыто 29 алмазов >100 карат, в том числе 8 алмазов >200 карат. На руднике 2020 г. начался с обнаружения высококачественного алмаза массой 549 карат с оценочной стоимостью более 27 млн долл. США. (рис. 9). В течение 11 месяцев

предприятие в России, которое использует данную технологию и оборудование в промышленных масштабах для выявления особо крупных кристаллов алмазов (рис. 10). Рентгеновские снимки, выдаваемые анализатором сепаратора, обрабатываются по специальному алгоритму, который переводит данные в графический вид и анализирует их оригинальной компьютерной программой сепаратора. При получении сигнала о на-

¹⁰ Все данные взяты на сайте компании <https://www.lucaradiamond.com/newsroom/news-releases/>

2020 г. извлечено 32 алмаза массой более 100 карат и 11 камней массой более 200 карат. 11 ноября 2020 г. обнаружен гигант ювелирного качества массой 998 карат¹⁰. Результаты торгов лотами алмазного сырья и индивидуальных камней показывают очевидную высокую экономическую эффективность внедренной сенсорной технологии извлечения алмазов.

В Российской Федерации на обогатительной фабрике ГОКа им. В. Гриба компанией АО «АГД Даймондс» в 2018 г. запущен в работу сепаратор COM Tertiary XRT 1200/D производства компании «ТОМРА» (Германия). АО «АГД Даймондс» — первое алмазодобывающее пред-



Рис. 9. Уникальные камни, обнаруженные в кимберлитах Карове с применением технологии XTR



Рис. 10. Сепаратор Tertiary XRT 1200/D на обогатительной фабрике трубки им. В. Гриба

личии алмазов (включая камни размерностью 80–100 карат и более) оперативно производится их извлечение из потока.

Алмазодобывающая компания Debswana, совместное предприятие De Beers и правительство Ботсваны ввели в эксплуатацию два сепаратора с технологией рентгеновской трансмиссии с высокой пропускной способностью на своем крупнейшем руднике Джваненг (Jwaneng)¹¹. Внедрение новых разработок является основным элементом пилотного плана компании по добыче крупных алмазов. Глава компании DebTech De Beers Гордон Тейлор¹² заявил, что крупнозернистые сепараторы XRT Coarse Concentrator Plus CC+ будут перерабатывать кимберлит с суммарной производительностью до 500 т в час. Основная цель внедрения установок — это добыча крупных алмазов. На Джваненге добывается более 1 млн карат в течение месяца.

Применение XRT сепарации на золоторудных месторождениях

Рудник Кенсингтон (Аляска) промышленные испытания XRT технологии, переработано 40,2 тыс. т забалансовой руды с содержанием 1,5 г/т (в балансовой руде — 6–8 г/т). В процессе сортировки получено 3 050 т кускового концентрата с содержанием 8,7 г/т (в концентрат дополнительно извлечено 750 унций золота, извлечение из исходного продукта — 45 %)¹³.

На золоторудном *месторождении Two Mile Hill* (Австралия) проведены испытания предварительного обогащения методами XRT и фотометрии. Результаты сортировки показали, что выход обогащенного продукта (по различным пробам) составляет 39–51 %, при этом содержание металла в продукте возрастает в 1,55–2,1 раза, а извлечение металла в обогащенный продукт составило 83–93 % (в одной пробе — 67 %).

¹¹ <http://www.debtech.com/product-XRT-plus.html>

¹² Modern Mining November 2018, <https://user-54716422671.cld.bz/Modern-Mining-November-2018/47/#zoom=z>

¹³ http://dggs.alaska.gov/webpubs/dggs/po/text/po2016_001.pdf

Результаты сортировки использованы для обоснования снижения содержания золота в руде с 1,4 г/т до 1,1 г/т, при котором минеральные ресурсы золота увеличились и достигли 1,5 млн унций. Результаты сортировки предполагается использовать при обосновании подземной добычи руды¹⁴.

Подробный материал по исследованию предварительного обогащения золотой руды приводится *компанией Outotec Pty Ltd* на примере одного анонимного проекта [21].

В теоретической части статьи авторы обращают внимание, что доступные сенсорные технологии для сортировки руды не способны непосредственно обнаруживать золото в кусках. Самородное золото часто имеет слишком малые размеры и не могут разрешаться на современных сенсорных системах. Поэтому для выделения золотосодержащих кусков используются связанные с золотом альтернативные характеристики рудного материала. Если золото ассоциирует с сульфидными минералами (пиритом, арсенопиритом и пр.), то можно использовать сенсорную технологию XRT.

Но часто золото присутствует в кварцевых жилах с низкими концентрациями сульфидов и неявной их связью с золотом. Здесь золото часто связано с кварцем и, в частности, концентрируется в зонах контактов кварцевых жил. Кварц может быть обнаружен недавно разработанными лазерными датчиками. При облучении лазерами потока частиц измеряется степень поглощения луча, его рассеивание. На частицах кварца лазерный свет проникает в частицу материала, где он отражается, преломляется и рассеивается внутренней дефектной структурой кристалла. В этом случае кристалл будет демонстрировать свечение низкой интенсивности на более широкой области (рис. 11). Это явление используется для различия (полу-) и прозрачных кристаллических минералов от непрозрачных минералов, которые только отражают или поглощают лазерный свет.

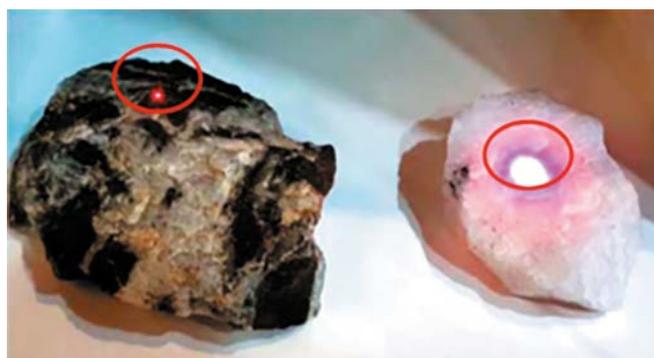


Рис. 11. Лазерный луч освещает непрозрачный минерал (слева) и кварц (справа). Кварц «светится» на гораздо большей площади, чем непрозрачный минерал. Явление рассеивания фиксируется для распознавания сортности куска [21]

¹⁴ <http://www.middleisland.com.au/wp-content/uploads/2018/07/30-July-2018-Phase-II-Ore-Sorting-Trials.pdf>

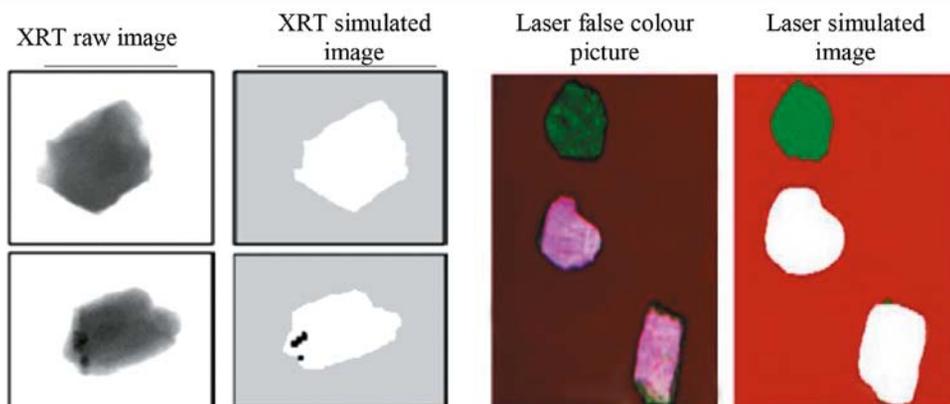


Рис. 12. На левом верхнем изображении — частица не содержащая сульфидные включения по методу XRT; снизу — частица с включениями сульфидных минералов. Представлены необработанные изображения и смоделированные компьютером. На правом изображении — частицы в ложных цветах (слева) и смоделированные изображения кварца (белое) и непрозрачного силиката (зеленое) [21]

Золотые руды, как правило, поддаются сортировке частиц с помощью XRT или лазерных датчиков, или комбинации обоих этих методов. В ходе испытаний авторы статьи обнаружили, что двухступенчатая сортировочная технологическая схема, состоящая в последовательном применении XRT и сенсора лазерного поглощения, оптимизируют извлечение металла в обогащенный продукт. Интерпретация этих результатов экспериментов показывает, что даже для месторождений золотокварцевого типа золото может быть связано с пиритом как внутри кварцевой жилы, так и снаружи, а также чисто с кварцем, хотя часто в более низких концентрациях. С этими двухступенчатыми технологическими схемами сортировки частиц извлечение в обогащенный продукт всегда более 90 %, а удаление безрудной массы колеблется от 30 до 60 %.

Первым этапом работ является проведение предварительной оценки возможности сенсорной сортировки на основе данных минералогического описания керна скважин.

Второй этап заключается в определении контрастности руд, для чего отбирается 10–20 стандартных образцов каждой литологической разновидности руд и вмещающих пород, забалансовой руды, образцы со склада пустых пород. Отклик различных датчиков на каждый материал проверяется для определения различий в откликах между различными типами пород. Затем проводится анализ каждой породы для корреляции откликов датчика с оценкой содержаний полезных компонентов. Производится предварительный выбор датчика (можно выбрать один или несколько сенсоров).

Третий этап производится на машинах промышленного масштаба, его цель состоит в том, чтобы предоставить всю необходимую информацию об эффективности сортировки, чтобы доказать ее возможность, определить цифры извлечения и качества полученных продуктов. Во время массовых испытаний наиболее перспективная сенсорная система настраивается и калибруется для конкретного типа руд, и поскольку

используются машины промышленного масштаба для полной коммерческой реализации не требуются коэффициенты масштабирования.

По этой схеме авторами статьи выполнено исследование сортировки руд золотого месторождения. Месторождение представляет собой высококачественное орогенное месторождение золота, сложенное кварц-карбонат-сульфидными жилами. Из-за того, что золото связано с сульфидами (главным образом пиритом и халькопиритом) и кварцсодержащими

частицами в этом месторождении, в качестве первой стадии была выбрана машина ленточного типа XRT (рис. 12, слева). После удаления из потока сульфидсодержащих кусков на второй стадии сортировки выполнено лазерное распознавание кварцевых кусков и получение кварц-золотоносного продукта (рис. 12, справа).

Итоги разделения пробы руды (массой 4,5 т) показали весьма высокие результаты, которые характеризуются крайне успешным применением методик (табл. 4). Сортировка материала крупностью +35–70 мм и +15–35 мм методом XRT позволяет извлечь в концентрат с качеством 18–23 г/т более 97 % золота, при этом выход такого концентрата составляет около 40 %. Во вторую стадию сепарации извлекается еще 1,4–1,9 % золота в низкокачественный кварцевый продукт.

Расчет показателей экономической эффективности показал, что сортировка материала позволяет получить NPV на 16 % больше, чем без использования этой технологии. Расчеты показали, что применение второй сепарации (лазерной) не приводит к улучшению экономических показателей, а даже наоборот.

Наконец, с учетом возможностей сортировки было рассчитано оптимальное бортовое содержание, кото-

Таблица 4
Результаты сепарации золотой руды

Класс руды, мм	Продукты	Выход, %	Au, г/т	Извлечение, %
+15–35	XRT	41,8	23,04	97,7
	Laser	16,5	0,83	1,4
	Хвост	40,6	0,21	0,9
	Исходный	100	9,86	100
+35–70	XRT	41,9	17,94	97,7
	Laser	19,1	0,75	1,9
	Хвост	38,1	0,07	0,4
	Исходный	100	7,69	100

Таблица 5
Сводные показатели эффективности разных схем реализации проекта

Параметры	Без сортировки	С XRT	XRT+ Laser	Измененный план
Кумулятивный денежный поток, М\$	587	656	640	719
NPV (8 %)	258	300	288	328
IRR (8 %)	27,8	31,6	29,9	31,1
Срок окупаемости, лет	3,6	3,2	3,3	3,2

рое привело к увеличению производительности предприятия при более низкой себестоимости продукции. Расчетная выручка выросла на 22,5 %, а NPV на 27 % (табл. 5).

Важный вопрос применения современных методов сортировки поднимается A.N. Parry и G. Van Wyk [23], которые задались вопросом о пределе применимости методов предварительного обогащения на золотых рудах с низкими содержаниями.

Norseman gold mining — старейший работающий рудник в Австралии, эксплуатация высококачественных руд, приуроченных к маломощным кварцевым жилам, продолжается уже 120 лет, за это время здесь добыто более 170 т золота. С такой длинной историей подземной добычи жильных золотых руд неудивительно, что на предприятии накоплены огромные склады забалансовых руд и руд убогого качества. На эти склады поступала забалансовая руда, добываемая на вскрыше рудных тел, из многочисленных небольших открытых разработок. Один из основных складов включает руду с низким содержанием золота, извлеченную из подземных рудников Bullen, Ajax и St. Pats. Предполагается, что запас содержит приблизительно 1,2–1,5 млн т низкосортной руды с ориентировочным содержанием металла 0,8 г/т. Никакой систематической программы анализа или отбора проб с целью определения точной оценки содержания и ресурсов металла не проводилось.

В настоящее время основной источник сырья для обогатительной фабрики — оксидная руда из карьера North Royal, которая характеризуется высоким содержанием глины. Для повышения производительности предприятия и извлечения металла требуется подмешивать неокисленное сырье. Это стимулировало интерес к складу низкокачественных руд Bullen, а для того, чтобы повысить содержание золота в сырье предполагается применить XRT сортировку на аппаратах STEINERT XSS T.

Тестовые испытания были выполнены на пробах массой несколько сот кг, однако пробы были с содержанием ниже расчетного (0,25 г/т вместо 0,6–0,8 г/т). Несмотря на это, показатели XRT сепарации были весьма обнадеживающие. В результате применения XRT на классах руды +25–100 мм получен обогащенный продукт, содержащий 3 г/т с выходом 8 %, извлечение металла составило более 98 %, поскольку в отвальном продукте содержание золота менее 0,01 г/т.

Технологическая схема сортировки руды построена для содержания золота 0,8 г/т, она предполагает, что мелкие фракции –25 мм, которые не подвергаются сортировке, естественным образом повышаются до содержания 1,12 г/т (повышение на 40 %). С другой стороны, в материале для сортировки содержание металла снижается до 0,66 г/т. В результате сепарации получают концентрат с содержанием 4,24 г/т, а в объединенном продукте с мелочью (–25 мм), содержание — 1,93 г/т. Ожидается, что для обеспечения работы предприятия пропускная способность может быть достигнута путем установки одного отдельного рудосортировщика STEINERT XSS T с производительностью 50 т/ч (табл. 6).

В статье C. Kleine, e.a. [13] описывается опыт применения XRT сортировки на *месторождении Pilgrim's Rest* компании Transvaal Gold Mining Estate Limited (TGME), чтобы переработать материал отвалов пустой породы, образовавшийся при отработке кварцево-сульфидного жильного месторождения. Золотая минерализация сопровождается различными сульфидами железа, меди, мышьяка и висмута, а в качестве пустых вмещающих пород встречаются сланцы, доломит и граниты.

Испытания XRT-сортировки проводились в процессе перестройки комплекса тяжелосредней сепарации и рассматривается как замена этого процесса. Результаты показали возможность выделения из пустых пород 10 % руд с содержанием золота около 0,6 г/т (при этом в отходах остается 0,2 г/т металла). Предполагается расширение ДСК в три раза до 600 т/день. XRT-сортировка показывает большой потенциал для сортировки мас-

Таблица 6
Технико-экономические показатели обогатительной установки

Производительность, тыс. т/год	500
Ресурсы на складе, Mt	1,5
Время отработки, год	3
Среднее содержание золота, г/т	0,8
Выход мелочи –20+0 мм	30
Класс сортировки, мм	+25–65
Выход концентрата XRT, %	15
Извлечение на XRT, %	96
Извлечение на обогатительной фабрике, %	92
Эксплуатационные затраты:	
Подготовка к сортировке (экскавация, дробление, классификация, транспортировка), \$/т	6,7
Переработка XRT (+ материалы и обслуживание), \$/т	3,7
Обогащение на фабрике, \$/т	24,5
Капитальные затраты, млн \$	2,2



Рис. 13. Мобильная установка по переработке руд STEINERT [22]

сивных сульфидных руд и подходит как для переработки отходов, так и для рудной сортировки. Сортировка XRT — это процесс сухого разделения с небольшими требованиями к инфраструктуре и низкими эксплуатационными расходами.

XRT сортировка различных видов сырья

В процессе разработки схемы переработки *ванадий-графитовых руд на месторождении Каула* (Caula Graphite-Vanadium, Мозамбик) выполнено тестирование XRT сортировки в сочетании с измерением электропроводимости кусков руды. В результате получены отходы с отвальными содержаниями полезных компонентов, а обогащенный продукт разделен на два класса. Результаты демонстрируют потенциал увеличения производительности предприятия без увеличения размера обогатительной установки и эксплуатационных расходов¹⁵.

Результаты обогащения мелкокусковой *хромитовой руды Бушвельдского массива* на руднике LG6 (Eastern Chrome Mines, ЮАР) с применением сортировки методом XTR показало его полное преимущество перед используемой в настоящее время технологией тяжелосреднего обогащения. Технология XRT подразумевает использование руды более низкого качества 20–28 % Cr₂O₃, при этом в концентрате получают более 40 % Cr₂O₃, а в отвальном продукте менее 12 %. При использовании ТСС качество концентрата не превышает 38 %. Отмечается, что себестоимость получения мелкокускового концентрата по технологии XRT вдвое ниже себестоимости концентрата ТСС¹⁶.

На *подземном руднике Flying Fox* в Австралии добываются сульфидные никелевые руды, среднее содержание металла в руде составляет 4,4 %, производительность рудника 240 тыс. т руды в год (2017 г.). Руда перевозится на обогатительную фабрику Cosmic Boy Concentrator, находящуюся в 26 км. К 2017 г. на промплощадке рудника скопилось 167 тыс. т забалансовой руды, содержащей 1,21 % Ni [22].

Минералогическим анализом было показано, что рудные минералы распределены по кускам забалансовой

руды неравномерно, в ней фиксируются отдельные сегрегации шлиры сплошной руды, которые практически полностью высвобождаются при крупности дробления до 90–100 мм.

Опыты по разработке технологии и режима обогащения проводились на аппарате STEINERT XSS T¹⁷ в Германии, которые показали отличные результаты.

Непосредственно на промплощадке был собран дробильно-сортировочный комплекс, который обеспечивал дробление забалансовой руды до 90–100 мм, классификацию материала по классу 20 мм. Крупная фракция подвергалась сортировке. Мобильная установка для сортировки руды, используемая в Flying Fox, была оснащена системой двойного сканирования с возможностью использовать XRT-сканирование и индукционное сканирование (которое измеряет электромагнитный отклик отдельных частиц) (рис. 13). Из предыдущих испытаний на сульфидной руде было установлено, что индукционное сканирование также было очень эффективным при отделении сульфидных минералов от породы.

Ввод в эксплуатацию мобильного сортировщика руды состоялся в январе 2017 г. и продолжался всего около 6 месяцев. За это время было обработано 167660 т низкокачественных руд с содержанием

Таблица 7
Результаты сепарации руды на руднике Ловиса

Параметры		2019	2020
		42–52 недели	1–6 недели
Поступило на сортировку, т		3727	3398
Содержание	Zn, %	7,87	7,86
	Pb, %	4,78	5,15
Предконцентрат	т	2698	2368
	%	72,4	69,7
Содержание	Zn, %	10,3	10,5
	Pb, %	6,3	7,0
Извлечение в концентрат	Zn, %	94,7	93,1
	Pb, %	95,4	94,7
Отходы	т	1029	1030
	%	27,6	30,3
Содержание	Zn, %	1,5	1,8
	Pb, %	0,8	0,9
Извлечение в хвосты	Zn, %	5,3	6,9
	Pb, %	4,6	5,3

¹⁵ https://www.resourcesrisingstars.com.au/sites/default/files/MUS_120618.pdf

¹⁶ https://www.crown.co.za/images/magazines/mechchem-africa/2020/TOMRAs_XRT_sorting_delivers_high_recovery.pdf

¹⁷ <https://steinertglobal.com/>

никеля 1,21 %. После дробления и просеивания было получено 73064 т отсева (менее 20 мм) со слегка обогащенным содержанием 1,38 % Ni. Из 94596 т сырья для сортировки руды (>20 мм и <90 мм) и с содержанием никеля 1,08 % было получено 18882 т кондиционной руды с содержанием 4,07 % никеля. Отходы сортировщика 75714 т с содержанием никеля 0,33 % были классифицированы как отходы.

Общее извлечение никеля после объединения обогащенного продукта и отсева <20 мм, полученного в результате дробления и просеивания, составило 87,6 %.

Обогащенный продукт был переработан на обогатительной фабрике Cosmic Boy Concentrator в течение второй половины 2017 г. Заскладированная мелочь подмешивается к высокосортным рудам в небольших количествах и постепенно расходуется.

В результате на предприятии дополнительно получено 675 т никеля из обогащенного продукта сепарации (выручка около 8,5 млн долл. США) и 825 т никеля предполагается получить из отсева мелочи (около 9 млн долл. США).

Месторождение и рудник Ловиса Груван (Швеция), подземная добыча полиметаллической руды. Технологический процесс заключается в дроблении до 45 мм, классификации по классу 12 мм, сортировке класса 12–45 мм, объединении предконцентрата с минусовым продуктом (менее 12 мм) и отправке на обогатительную фабрику в Польшу. Надрешетный продукт — машинный класс, его выход 80 % от исходного. Подрешетный продукт смешивается с предконцентратом сепарации. Результаты по сепарации руды XRT методом за десять последних недель 2019 г. и первых шести недель 2020 г. свидетельствуют о высокой эффективности процесса (табл. 7).

Другой пример сходного сырья приведен в исследовании К. Bartram, e.a. [11], которые занимались сепарацией низкосортных серебро-полиметаллических руд на предприятиях *Volcan Compañía Minera SAA* в Перу. Это довольно крупное предприятие, в 2015 г. суммарная добыча на всех рудниках составила 7,9 млн т, а общая выручка достигла 795 млн долл. США.

Помимо балансовых руд на предприятиях накоплены значительные запасы забалансового и низкосортного сырья. Так, на

Таблица 8
Экономические результаты сортировки руды на предприятии Cerro de Pasco

Эксплуатационные затраты (\$/т):	Объемы
Перевалка и транспортировка	1,11
Дробление и классификация (для XRT)	1,76
Сортировка XRT	0,85
Удаление хвостов, транспортировка	1,31
Измельчение и флотация	12,59
Хвосты флотации	2,83
Административные расходы и продажа	3,16
Капитальные расходы (M\$):	
XRT + ДСК	5,5

серебро-полиметаллическом предприятии Cerro de Pasco в регионе Паско накоплено около 4,1 млн т низкосортной руды, которые и явились предметом исследования.

Проведенные испытания позволили выбрать в качестве оптимального метод XRT (на двухканальном сепараторе STEINERT XSS), а размер руды был принят в диапазоне 12–35 мм. Такие условия подготовки руды обеспечили лучшие показатели сортировки (рис. 14, табл. 8). Руда с содержанием поступает со штабеля на классификацию по классу 12 мм в замкнутом цикле с дробилкой. Готовый класс +12–35 мм идет на сепарацию, а мелочь, обогащенная компонентами примерно в 1,5 раза, не обогащается (выход –15 %).

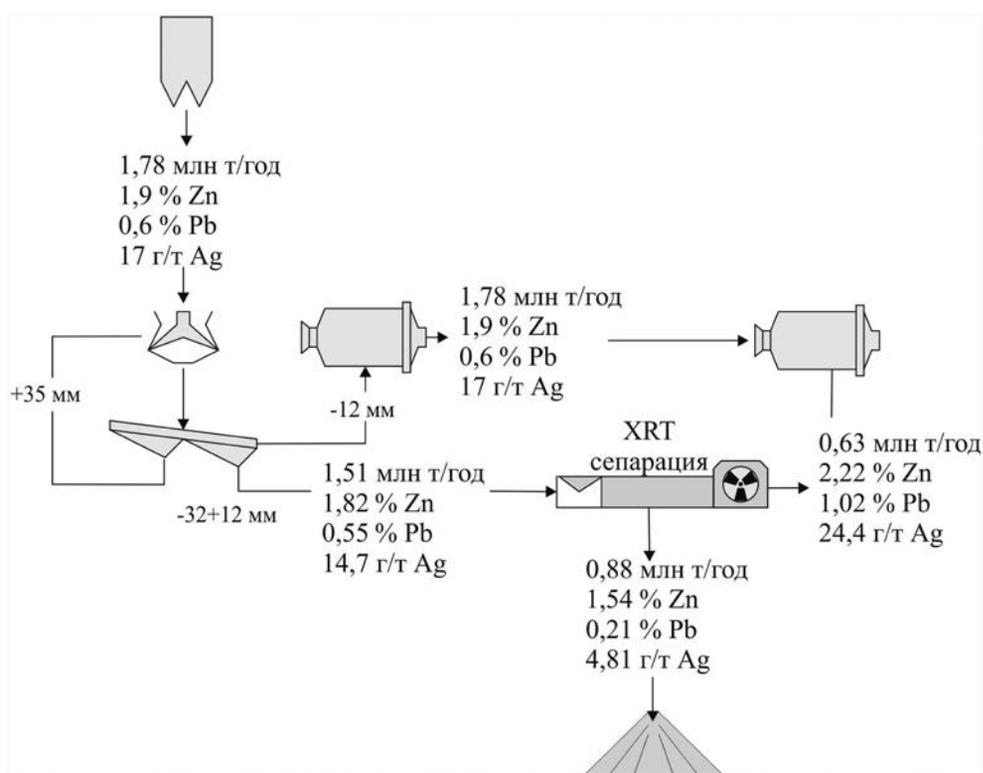


Рис. 14. Технологическая схема предварительной концентрации низкосортной руды на предприятии Cerro de Pasco. По К. Bartram, e.a. [11]

Эта рудная мелочь объединяется с концентратом ХРТ сепарации, поэтому на флотацию отправляется обогащенный продукт с содержанием 2,26 % Zn, 0,98 % Pb и 26,2 г/т Ag. Извлечение металлов в обогащенный продукт питания флотационной фабрики составляет 83–86 %, а для цинка — 60 %. Выход крупнокускового отвального продукта составил 49 %.

Для того, чтобы загрузить флотационные мощности в 900 тыс. т/г потребовалось добывать со склада низкокачественной руды 1,78 млн т сырья. Внедрение сортировщика руды позволяет примерно вдвое увеличить скорость обработки запасов. Прогнозируемое время, необходимое для обработки запасов, сокращено с 55 до 28 месяцев.

Обработка низкокачественных запасов в Серро-де-Паско без какой-либо предварительной концентрации руды невозможна, так как при современном уровне цен образуется небольшой, но отрицательный валовой денежный поток. Тем не менее, при предварительной концентрации запасов прогнозируется высокая жизнеспособность проекта, а прогнозируемый валовой денежный поток приближается к 1 млн долл. США в месяц. Расчетная чистая приведенная стоимость (NPV) с использованием ставки дисконтирования 10 % составляет 18,3 млн долл. США, исходя из срока реализации проекта за 28 месяцев.

J. Lessard, e.a. [16] показали возможность применения метода ХРТ сепарации при обогащении молибденовой руды из *месторождений Сора и Жирекен* (Россия) (табл. 9).

Несмотря на то что результаты сепарации получены на откровенно непредставительных пробах, авторы статьи рассматривают несколько вариантов применения сепарации на данных рудниках:

- базовый вариант без сортировки руды;
- вариант с сортировкой и сокращением материала, отправляемым на измельчение;
- вариант с сортировкой руды и увеличением производительности рудников.

Делается вывод о привлекательности третьего варианта отработки месторождения.

В статье М.М. Veras, e.a. [26] приводятся данные по сортировке *редкоземельного сырья месторождения*

Таблица 9
Результаты ХРТ сортировки молибденовых руд России

Технологические продукты	Выход, %	Содержание Мо, %	Извлечение Мо, %
Сорское			
Концентрат	17,2	0,21	88
Хвост	82,8	0,006	12
Руда	100	0,041	100
Жирекенское			
Концентрат	7,4	0,48	87
Хвост	92,6	0,012	13
Руда	100	0,041	100

Мадейра (Питинга, Бразилия). В этой работе приводятся данные успешного применения ХРТ сортировки для разделения руд богатых тяжелыми редкоземельными элементами — ксенотим, гагаринит (Y) и флюорит (Ce, La).

Большая статья С. Robben, e.a. [25] посвящена вопросам переработки руд на крупнейшем и богатейшем *месторождении олова в мире Сан-Рафаель* в Перу. На этом месторождении добывается около 6 % металла в мире. Основными методами переработки руды являются гравитационная сепарация и флотация. В 2016 г. новым дополнением к обогатительной фабрике стал комплекс сортировки руды на основе рентгеновской трансмиссии (ХРТ). Задача состояла в том, чтобы выделить крупнокусковые отходы с отвальными содержаниями олова из низкосортного материала подземного рудника. Содержание в низкосортной руде около 0,6 % олова ХРТ-сортировка позволяет повысить это содержание до 2,8 % при извлечении 90 % и при массовом выходе продукта около 19 %. Эта обогащенная фракция поступает в основную обогатительную установку.

Завод, рассчитанный на 3600 т руды в сутки, был введен в эксплуатацию в 2016 г. Общие капитальные затраты составили 24 млн долл. США и были окуплены в течение 4 месяцев. Вклад в производство рафинированного олова на 2017 г. составил 6000 т металла. Таким образом, положительные воздействия были в следующем:

- добавленная стоимость от ранее неэкономичных отходов;
- повышение производительности флотационно-гравитационной фабрики;
- сокращение бортового содержания и увеличение запасов;
- снижение негативного воздействия на окружающую среду.

В документе описывается проект от концепции до этапа разработки, включая тестовую работу, подтверждающую осуществимость, до обсуждения эксплуатационных данных и включает общий опыт эксплуатации и обслуживания.

Платиновый рудник Potgietersus — это открытый карьер в комплексе Бушвельд в Южной Африке, на котором добываются и обогащаются малосульфидные платинометалльные руды. Вопросы разделения этих руд методом ХРТ обсуждаются в диссертации Е.Н.А Klifman [14].

ХРТ сепарация редкометалльного сырья

Компания Wolfram Bergbau und Hütten AG (WHB) в Felbertal (Австрия) разрабатывает вольфрамовые руды на руднике Mittersill Mine. Вследствие естественных причин содержание металла в руде постепенно падало и достигло уровня 0,26–0,28 %, что сделало близким к убыточному процесс обогащения [19]. Для решения проблемы было решено внедрить комплекс с предварительной концентрацией руды методом ХРТ. Для чего была проведена серия технологических испытаний. Испытания проводились на гранулометрических

классах дробленой руды 16–30 и 30–60 мм, суммарный выход которых составляет 50–55 %. Материал менее 16 мм сразу отправляется на измельчение. Применение XTR сепараторов (2 шт.) суммарной производительностью 75 т/ч позволяют выделять 50–55 % крупнокускового отвального продукта, содержащего всего 0,03 % триоксида вольфрама. Таким образом, из процесса измельчения изъято практически четверть потока руды. Содержание вольфрама в питании флотации составило 0,38 %.

После первой серии испытаний было проведено предварительное исследование, в результате которого была доказана возможность установки сортировочной машины для предварительного обогащения вольфрамовой руды, и соответственно была построена сортировочная установка [19].

Тем не менее, были проведены более подробные исследования, чтобы определить возможность увеличения производительности шахты или снижения производительности для технологической установки при одновременном производстве такого же качества и количества концентрата или комбинации того и другого для определения оптимальной выполнимости. Исследования показали, что общая стоимость сортировочной установки составляет около 2,05 млн евро. Основные статьи инвестиций составляют 0,9 млн евро в качестве стоимости двух сортировочных машин, а также здания со вспомогательными конструкциями и стоимость новой дробилки 0,35 и 0,2 млн евро соответственно. Эксплуатационные расходы состоят в основном из стоимости деталей копыя, технического обслуживания и электричества, которые оцениваются в 53,5 евро/час (из расчета 4000 часов работы). Соответственно общие эксплуатационные расходы составят около 148000 евро в год (табл. 10, 11).

В этом случае (табл. 10) наблюдается снижение производительности флотационной фабрики при улучшении показателей переработки за счет увеличения содержания металла в питании флотации. В этом случае тоннаж конечного концентрата поддерживается постоянным, при этом отсортированная руда более высокого качества обрабатывается при более низкой производительности мельницы. Это приводит к снижению энергопотребления при измельчении и связанных с этим затрат на обработку (в сумме 800 тыс. евро в год).

Второй сценарий использования технологии XRT заключается в использовании большего количества, но низкосортной руды (табл. 11). В расчете принято, что содержание в питании флотации одинаковое. Результаты моделирования показали, что ожидаемый рост выручки составит до 2,6 млн евро в год. Следует отметить, что дополнительный доход предприятию может принести продажа отвального продукта сортировки (как щебня), что в результате дает дополнительный доход 1,5 млн евро в год в обоих вариантах.

Анализ экономической эффективности показывает, что период окупаемости внедрения установки XTR сортировки составляет 2,3 года, а расчет внутрифир-

Таблица 10
Результаты расчета экономической эффективности XRT сортировки при постоянном количестве товарного концентрата

Показатели	без XRT	с XRT
Производительность (тыс. т / год)	470,3	480,4
Содержание в руде (WO ₃ , %)	0,265	0,265
Отходы от сортировки (тыс. т / год)	—	114,7
Степень подготовки к обработке (WO ₃ , %)	0,265	0,34
Извлечение при флотации, %	84,7	85,2
Сквозное извлечение (сортировка + флотация), %	—	82,95
Производство-всего чистого WO ₃ (т)	1056	1056
Стоимость добычи (@ 20 €/т), М€	9,41	9,61
Операционная стоимость сортировки (М€/год)	—	0,15
Стоимость процесса (@ 11 €/т — флотация), М€	5,17	4,02
Экономия (М€/год)		0,8

Таблица 11
Альтернативное увеличение производительности рудника при постоянном качестве питания флотации

Показатели	без XRT	с XRT
Производительность (тыс. т / год)	375 (75 т/ч)	500 (100 т/ч)
Содержание в руде (WO ₃ , %)	0,28	0,28
Сквозное извлечение (сортировка + флотация), %	87	84
Производство WO ₃ (т)	913,5	1176
Доход (@ 20 €/ кг - WO ₃), М€/год	18,3	23,5
Увеличение выручки, М€/год	—	5,25
Дополнительные расходы на добычу (@ 20 €/ т), М€/год	—	2,5
Операционная стоимость сортировки, М€/год	—	0,16
Потенциальная экономия после сортировки, М€/г	—	2,6

менной нормы доходности показал очень интересную цифру 42 % даже для первого варианта реализации схемы.

Результаты экспериментов и расчетов использованы при проектировании и сооружении установки предварительного обогащения на руднике Миттерзиль (о чем можно посмотреть на видео¹⁸) по ссылке.

В процессе подготовки Технического отчета по JORC один из авторов статьи принимал участие в исследовании возможности применения методов предконцентрации на двух вольфрамовых месторождениях

¹⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=9bpoQWgWWFE>

Таблица 12
Показатели обогащения руды

Продукты	Выход, %	Содержание, WO ₃ , масс. %	Извлечение, WO ₃ , %
Сульфидный концентрат	3,9	0,03	1,3
Шеелитовый концентрат	0,125	55	74,2
Хвосты флотации	60,975	0,023	15,1
Итого: Обогащенный продукт предконцентрации	65	0,165	90,6
Обедненный продукт — отвальный щебнистый продукт (фр. -70+10 мм)	35	0,025	9,4
Итого: исходная товарная руда	100	0,093	100

в Казахстане. Был произведен отбор представительных проб, которые изучались различными методами в инженеринговых центрах России, Казахстана и Китая.

Первое месторождение является весьма крупным по размерам, но характеризуется низкокачественными рудами. Оно представлено штокверком маломощных кварцевых жил (1–3 см), несущих рудную минерализацию. На месторождении предполагается открытая добыча руды с производительностью 7 млн т/год. В регламенте на проектирование (разработка китайских специалистов HPU Technology) предполагается использование XRT сепараторов китайского производства. Отличительной чертой китайских сепараторов является высокая разрешающая способность регистрирующих устройств аппаратов (на порядок выше, в сравнение с прочими образцами). Результаты базируются на натуральных испытаниях проб, самая крупная из которых массой 10 т. Предконцентрат, включающий концентрат XRT сепарации на классах -70+10 мм и отсев -10+0 мм, содержит 0,165 % WO₃ при извлечении 90,6 % (табл. 12). В хвостах (щебень) — 0,025 % WO₃. Выход крупнокусковых хвостов — 35 % от исходной руды. Применение XRT вошло в состав Регламента на проектирование обогатительной фабрики и учтено во всех сценариях геолого-экономической оценки. Себестоимость операции сортировки составила 0,3 долл. США/т руды.

Другой пример, комплексные сульфидно-вольфрамовые руды скарнового типа. Программа предварительного обогащения руд подразумевала эксперименты разными методами: тяжелые суспензии, рентгенометрический (XRF), рентгенолюминесцентный (XRL) и рентгеноабсорбционный (XRT).

Сравнение методов (испытания проб массой 1–5 т) показало преимущество XRT прежде всего по качеству сепарации (выход крупных хвостов — 40 %) и эксплуатационным затратам. Данные результаты вошли в Регламент на проектирование фабрики производительностью 3 млн т/год.

Заключение

Очевидно, что спектральные сенсорные технологии имеют огромный потенциал для интенсификации производства, в самом ближайшем будущем они будут активно реализовываться в горнодобывающей про-

мышленности. В качестве обоснования этого утверждения следует отметить следующее:

— сенсорная сортировка уже сейчас широко используется в пищевой, стекольной, бумажной, металлообрабатывающей промышленности, которые всегда были в авангарде развития подобных технологий;

— в последние годы получены существенные достижения в разработке

новых сенсорных систем, особенно основанных на применении рентгеновской трансмиссии и ближней инфракрасной области для сортировки минеральных объектов;

— разработаны промышленные прототипы аппаратов, объединяющих несколько сенсорных блоков, работающих на разных принципах таких, как XRT, XRF, SWIR, 3D лазерный сканер и других; важно то, что получаемые сигналы сводятся в единые интеллектуальные алгоритмы для принятия решений;

— имеется достаточное число конкретных примеров промышленного применения новых сенсорных технологий, демонстрирующие значительные успехи при обогащении руд золота, цветных металлов, индустриальных минералов и топливно-энергетического сырья;

— созданы достаточно надежные технологии (в том числе, зарекомендовавших себя в промышленных условиях), обладающие высокой производительностью сортировки; за последние 10 лет производительность сортировщиков выросла в 6–8 раз и достигла 300–400 т/т (как, например, в угольной отрасли);

— разработаны варианты мобильных дробильно-сортировочных установок; они, как правило, монтируются непосредственно на горных предприятиях, бортах карьеров и возле шахт; кроме того, эти мобильные установки несут минимальные капитальные и операционные издержки и могут эффективно применяться для обработки даже небольших по объему складов низкокачественного сырья;

— новые сенсорные технологии приводят к уменьшению размеров хвостохранилищ, складов вскрышных пород и забалансовых руд; они снижают потребление воды, что благоприятно не только в экономическом плане, но и для обеспечения охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алушкин, И.В. Рентген-радиометрическая сепарация от TOMRA Sorting для предварительного обогащения угля / И.В. Алушкин, В.Б. Щипчин, И.Г. Корнеев // Уголь. — 2014. — № 5. — С. 100–103.
2. Архипов, О.А. Радиометрическая обогатимость руд при их разведке / О.А. Архипов. — М.: Недра, 1985. — 144 с.
3. Кобзев, А.С. Радиометрическое обогащение минерального сырья / А.С. Кобзев. — М.: Издательство «Горная книга», 2015. — 125 с.

4. Литвинцев, Э.Г. Люминесцентная сепарация неметаллического сырья / Э.Г. Литвинцев, Б.С. Горобец, А.А. Рогожин // Горный журнал. — 1998. — № 3. — С. 50–54.
5. Мальгин, О.И. Разработка технологии крупнопорционной сортировки руд месторождения Мурунтау / О.И. Мальгин, В.Е. Латышев, В.З. Петриенко и др. // Цветные металлы. — 1999. — № 7. — С. 32–34.
6. Мокроусов, В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд / В.А. Мокроусов, В.А. Лилеев. — М.: Недра, 1979. — 192 с.
7. Освоение и совершенствование обогащения руд в тяжелых суспензиях / Ю.С. Бадеев, Г.И. Иванов, А.В. Богданович и др. // ЦНИИЦветмет экономики и информации; серия: Обогащение руд цветных металлов. — М., 1980. — Вып. 4. — 45 с.
8. Ревнивцев, В.И. Рентгенрадиометрическое обогащение комплексных руд цветных и редких металлов / В.И. Ревнивцев, Т.Г. Рыбакова, Е.П. Леман. — М.: Недра, 1990. — 220 с.
9. Федоров, Ю.О. Предварительная концентрация при обогащении бедных и забалансовых руд / Ю.О. Федоров, В.П. Цой, О.В. Корень и др. // Горный журнал. — 1998. — № 1. — С. 26–29.
10. Ballantyne, G.R. Early rejection of gangue — How much energy will it cost to save energy? / G.R. Ballantyne, M. Hilden, M.S. Powell // In Comminution '12, ed. Wills, B. Mineral Engineering, Capetown, South Africa. 2012. 12p. (Ресурсы Интернет, http://www.ceecthefuture.org/wp-content/uploads/2013/02/Com-2012_BallantyneHildenPowell.pdf, дата обращения 28.11.2020).
11. Bartram, K. Upgrading of low grade silver-lead-zinc ore stockpiles at Volcan Compañía Minera SAA's base metals operations in Peru, using sensor-based ore sorting / K. Bartram, T. Parry, L.-L. Ampuero // Physical Separation 2017 in Cornwall, UK., 13 p.
12. Von Ketelholdt, L. 2017. Ore sorting of low grade gold sulphide deposits, in Proceedings of World Gold 2017 / von Ketelholdt L, Kotelo, L, and Schmalbein, N, (The Canadian Institute of Mining Metallurgy and Petroleum), Vancouver, 27–30 August 2017, 21p. (Ресурсы Интернет, <https://static1.squarespace.com/static/5abf03562971143214b948e0/t/5b23668f758d463f77f3b948/1529046681634/OreSort-Solutions-Paper-Tony-Parry-ALTA-2018.pdf>, , дата обращения 28.11.2020).
13. Kleine, C. XRT sorting of Massive Quartz Sulphide Type Gold Ore / C. Kleine, F. Riedel, Von Ketelholdt L., R. Murray // Sensorgestützte Sortierung 2010: gemeinsame Tagung des Instituts für Aufbereitung der RWTH Aachen und der GDMB, Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik e.V. am 9–11. März 2010 in Aachen; Clausthal-Zellerfeld: GDMB, Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik 122, (2010). — 17 p.
14. Klifman, E.H.A. DE-XRT method to separate platinum ore Section for Resource Engineering Department of Geoscience & Engineering Delft University of Technology; / E.H.A. Klifman. The Netherlands, 2013. (Ресурсы Интернет, <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:8bbf0acf-a992-4835-b2d3-f7fe373c1634/datastream/OBJ/download>, дата обращения 28.11.2020).
15. Kolacz, J. New high definition X-ray sorting system based on X-MINE detection technology / J. Kolacz. To cite this article: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nov. 2019. — Vol. 641. Issue 1. — 24 p.
16. Lessard, J. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics / J. Lessard, de Bakker, J and L. McHugh // Min. Eng., 2014. 65. — P. 88–97.
17. Lessard, J. Bridging the gap — understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit / J. Lessard, W. Sweetser, K. Bartram, J. Figueroa and L. McHugh // Min. Eng., 2015. 91. — P. 92–99.
18. Manouchehri, H.R. Sorting: possibilities, limitations and future In: Konferens i mineralteknik / H.R. Manouchehri // Swedish Mineral Processing Research Association, 2003.
19. Manouchehri, H.R. Techno-economic aspect of ore sorting — is sorting a massing part in mining industry? A case study at Sandvik's Mittersill tungsten mine / H.R. Manouchehri, A. Mosser and F. Gaul // IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings. — 11 p.
20. Murphy, B. 2012. Underground preconcentration by ore sorting and coarse gravity separation / Murphy, B, van Zyl, J and Domingo, G, / The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne, in Proceedings Narrow Vein Mining 2012. — P. 237–244.
21. Neilsen, B. 2017. Sensor-based ore sorting to maximize profit in a gold operation, in Metplant 2017 / D. Neilsen, J. Rohleder, H. Lehto and C. Robben (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), Perth, WA, 11 — 12 September, 2017. — P. 131–146.
22. Parry, A. The upgrading of low-grade nickel ore stockpiles at Western Areas Ltd Forrestania operations, using a mobile ore sorting plant / A. Parry and C. Fitzmaurice // 14th AusIMM Mill Operators' Conference 2018 / Brisbane, Qld, 29–31 August 2018.
23. Parry, A.N., 2016. Upgrading Low-grade Gold Ore Stockpiles by Preconcentration Using Ore Sorting — an Assessment of the Economic Impact and Viability, in Proceedings of the 13th AusIMM Mill Operators' Conference / Parry, A.N., and van Wyk, G, (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), Perth, WA, 10–12 October, 2016. — P. 179–189.
24. Robben, M.R. X-ray transmission sorting of tungsten ore / Robben M. R., Knapp H., Dehler M., Wotruba H. (<https://d-nb.info/1172229716/34>).
25. Robben, C. X-ray-transmission based ore sorting at the San Rafael tin mine In Minerals Engineering / C. Robben, P. Condori, A. Pinto, R. Machaca, A. Takala January 2020 145.
26. Veras, M.M. Affinity of dual energy X-ray transmission sensors on minerals bearing heavy rare earth elements / M.M. Veras, A.S. Young, C.R. Born, A. Szewczuk, A.C.B. Neto, C.O. Carlos Otávio Petter, C.H. Sampaio Minerals Engineering, 2020. — Volume 147, 1.

© Коллектив авторов, 2021

Сергей Викторович Петров // petrov64@gmail.com
Алексей Павлович Бороздин // borozdin@lims-lab.com
Тамара Александровна Головина // t.a.golovina@gmail.com
Юлия Сергеевна Шелухина // shelukhina@lims-lab.com

УДК 553.982.2

**Бугриева Е.П., Казанцев В.В., Величкина Н.С.
(АО «ВНИИХТ»), Стародубов А.В., Гулынин А.В.,
Петрин А.В. (ФГБУ «ВИМС»)**

О ТЕХНОГЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В БУРОВЫХ ШЛАМАХ

*Рассмотрены проблемы, связанные с повышенным содержанием естественных радионуклидов в шламонакопителях нефтедобывающего предприятия. Определены формы нахождения и концентрации радионуклидов, влияющие на технологию дезактивации и утилизации нефтезагрязненных грунтов. Основным радионуклидом, создающим повышенное γ -излучение, является Ra-226 и его дочерние продукты распада, изоморфно входящие в кристаллическую решетку новообразованного радиобарита. Для решения вопросов утилизации нефтешламов необходимо решение проблемы их радиоактивной безопасности. **Ключевые слова:** нефтешламы, радионуклиды, активность, радий, барит, изотоп, дезактивация, утилизация.*

Bugrieva E.P., Kazancev V.V., Velitchkina N.S. (VNIИHT), Starodubov A.V., Gulynin A.V., Petrin A.V. (VIMS)

ON TECHNOGENIC CONCENTRATION OF NATURAL RADIONUCLIDES IN DRILL SLUDGE

The problems associated with the increased content of natural radionuclides in the sludge accumulators of the oil-producing enterprise are considered. The forms of finding and concentration of radionuclides affecting the technology of decontamination and utilization of oil-contaminated soils are determined. The main radionuclide, that generates increased γ -radiation,