

# Разработка методики рентгеновской сепарации золота в рудах

Е. Д. Холопова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
wkhopolova@gmail.com

**Аннотация.** Современные методы, с учетом постепенной выработки богатых месторождений, становятся все менее рентабельными и для повышения экономической эффективности золотодобычи необходимо внедрять в процесс новые технологии. В работе проведено сравнение технических характеристик рентгенофлуоресцентного и рентгеноабсорбционного способов и показаны результаты макетирования рентгенооптической схемы сепаратора, позволившие оценить его основные параметры. Показаны результаты расчетов чувствительности метода и предела обнаружения золота в породе. Предварительная оценка эффективности метода показывает, что внедрение технологии предварительного обогащения золотосодержащих руд позволит существенно снизить стоимость добычи за счет исключения необходимости дробления всего объема перерабатываемой руды.

**Ключевые слова:** обогащение золотосодержащих руд; рентгенофлуоресцентный анализ; спектральный состав; оптимизация первичного излучения

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более или менее «богатые» месторождения золота (с концентрацией золота выше нескольких грамм на тонну) исчерпаны, поэтому в распоряжении добытчиков остаются, хотя и обширные, но все более трудоемкие для освоения месторождения. Одновременно с истощением руд существующие методы извлечения золота из породы достигли своего технического предела, вследствие чего возникла необходимость создания новых технологий добычи.

Сегодня основным способом извлечения золота из породы является гравитационный, требующий измельчения породы и который является достаточно дорогостоящим: в зависимости от богатства месторождения и крупности золота стоимость дробления составляет до 60 % себестоимости добычи. На заключительном этапе (после извлечения золота из породы) используются способы извлечения золота путем амальгамирования и/или путем выщелачивания цианидом натрия. В обоих случаях недостатком, наряду с дороговизной метода, является сложный процесс очистки сточных вод вследствие высокой ядовитости отходов производства.

В разных областях промышленности хорошо зарекомендовала себя идея сепарации веществ на основе

различных эффектов взаимодействия с ними рентгеновского излучения. В настоящее время успешно применяется сепарация зерна в агропромышленности, при добыче алмазов, обогащении полиметаллических руд и иных продуктов. При этом на данный момент не существует методики сепарации золота с использованием рентгеноабсорбционного или рентгеноспектрального анализа (РСА). Это связано с целым рядом факторов:

- недостаточный уровень чувствительности детекторов (как приемников излучения для рентгеноабсорбционного метода, так и спектрометров для РСА);
- несовершенство методов обработки сигналов;
- создание эффективного быстродействующего механизма (шибера или пневмоотсекателя) для разделения пустой породы и концентрата при требуемой крупности помола.

Следует особо отметить, что быстродействие рентгеночувствительных ПЗС-линеек, с помощью которых получают изображение частиц золота в породе не позволяют в настоящее время реализовать сепарацию руды в промышленном масштабе и более перспективным представляется использование рентгеноспектрального метода сепарации.

На основании поисковых работ в области сепарации различных руд опубликованы результаты исследования возможностей рентгеноабсорбционного способа оценки количественного содержания самородного золота в руде [1] и способа рентгеноабсорбционной сепарации алмазов [2], получены патенты на способ оценки содержания золота в породе [3] и способ сепарации алмазов [4], а также свидетельство на программу по определению содержания золота в породе. Показанные в публикациях результаты продемонстрировали высокую перспективность внедрения методики рентгеноспектрального анализа в процесс обогащения золотых руд.

В целом же создание рентгеноспектрального сепаратора золотой руды невозможно без решения следующих задач:

- разработка методики рентгеновского контроля породы рентгеноспектральным методом (требования к источнику и приемнику излучения,

схема съемки, требования к режимам работы и т. д.);

- оценка предельных возможностей комплекса по извлечению частиц золота различной крупности в идеальных и реальных условиях;
- разработка программного комплекса управления сепаратором (оптимальный набор технических средств рентгеновского контроля, включая алгоритмы и программное обеспечение);
- разработка и изготовление действующего макета сепаратора.

Наиболее важным фактором, определяющим характеристики сепаратора, является его рентгенооптическая схема, описывающая взаиморасположение источника излучения, анализируемого объекта и детектора. К параметрам рентгенооптической схемы относят спектральный состав первичного излучения, которые определяется материалом анода рентгеновской трубки, ее рабочим напряжением и током, а также, при наличии – толщиной и материалом первичного фильтра и параметрами вторичного фильтра.

## II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для отработки методики использовался макет рентгенолюминесцентного сепаратора алмазов, созданный для реализации соответствующей методики. Сепаратор оснащен вибропитателем, подающим раздробленную породу в контрольный лоток.

Здесь необходимо отметить, что, если для традиционного гравитационного «мокрого» обогащения разрабатываемых ныне относительно «бедных» руд породы необходимо дробить до крупности 0.5 – 1.0 мм, а то и менее (в зависимости от степени раскрытия золота), то для рентгеноспектрального анализа возможно дробление на порядок крупнее (до 10 мм), что, естественно, в несколько раз удешевляет подготовку.

При прохождении потока дробленой породы в лотке она облучается веерным пучком рентгеновского излучения. Система регистрации (спектрометр) регистрирует сигнал и при получении пика характеристического излучения от золота передает его в блок управления. В свою очередь блок управления формирует сигнал на пневмоотсекатель, который сдувает сегмент породы с обнаруженной частицей.

Предварительные эксперименты выявили невозможность использования имеющихся в макете источника излучения с вольфрамовым анодом и контрольного лотка из нержавеющей стали (рис. 1 и рис. 2).

На рис. 1 показан спектр при регистрации на полупроводниковый детектор (что невозможно ввиду его низкой скорости счета). Использование газового пропорционального детектора со скоростями счета до  $10^5$  импульсов в секунду, но с существенно более низким

энергетическим разрешением не позволяет регистрировать аналитический сигнал золота (рис. 2).

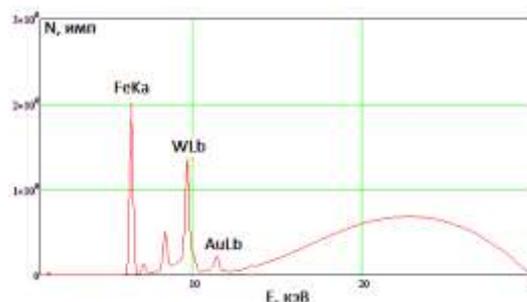


Рис. 1. Спектр при использовании вольфрамового анода и лотка из стали, разрешение детектора 200 эВ

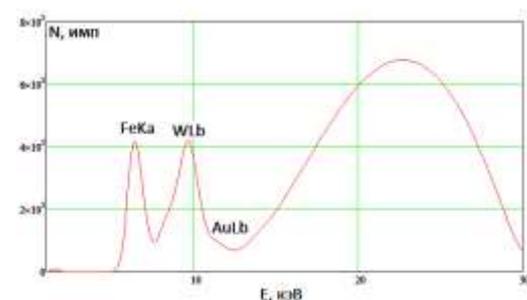


Рис. 2. Спектр при использовании вольфрамового анода и лотка из стали, разрешение детектора 800 эВ

Согласно общей теории возбуждения излучения, оптимальным рабочим напряжением трубки в нашем случае будет 30–35 кВ, при этом оптимальным представляется использование трубки с анодом из родия Rh (K $\alpha$ -линия – 20.2 кэВ) или серебра Ag (K $\alpha$ -линия – 22.1 кэВ), что дает возможность убрать линии рассеянного первичного излучения из области на спектре, где предполагается регистрация сигнала от золота.

Необходимо учитывать, что использование указанного рабочего напряжения трубки приведет к достаточному большому фону рассеянного тормозного излучения, что означает необходимость использования фильтра первичного излучения (на предварительном этапе отработки методики используются титановые фильтры с толщинами от 0.1 до 0.3 мм).

Поскольку порода представляет собой не сплошной поток анализируемого материала, а отдельные куски (с заданной крупностью) чаще всего с некоторым расстоянием между ними, детектор все время будет регистрировать характеристическое излучение от поддона или лотка, по которому осуществляется перемещение породы. Поэтому замена стального лотка на титановый (рис. 3 и рис. 4) приводит к тому, что и линии характеристического излучения от материала лотка не накладываются на линии золота.

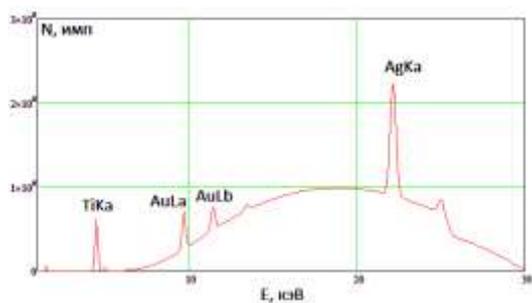


Рис. 3. Спектр при использовании серебряного анода и лотка из титана, разрешение детектора 200 эВ

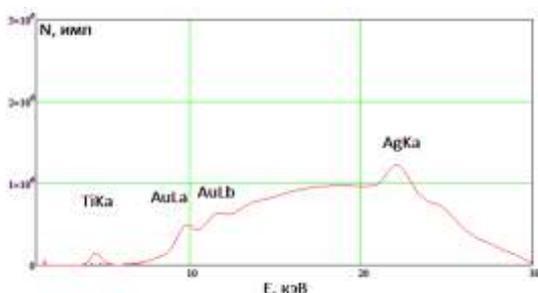


Рис. 4. Спектр при использовании серебряного анода и лотка из титана, разрешение детектора 800 эВ

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, предложенные на первом этапе разработки изменения, внесенные в исходный макет позволяют выполнить следующие условия:

- оптимизацию возбуждения L-серии золота в породе;
- отсутствие наложения рассеянного излучения характеристических линий материала анода на L-серию золота;
- минимизацию рассеянного фона первичного тормозного излучения в спектральной области регистрации L-серии золота.

Дальнейшая задача совершенствования методики сводится к нахождению некоего максимума функции, зависящей от нескольких параметров – контрастности аналитической линии (соотношения ее интенсивности к фону), ее абсолютной интенсивности (определяющей скорость принятия решения системой обработки информации), быстродействием регистрирующей системы в целом и исполнительных механизмов отсечки породы.

Для анализа спектров и управления элементами макета была разработана программа (рис. 5), позволяющая визуализировать регистрируемый спектр и осуществлять управление макетом.

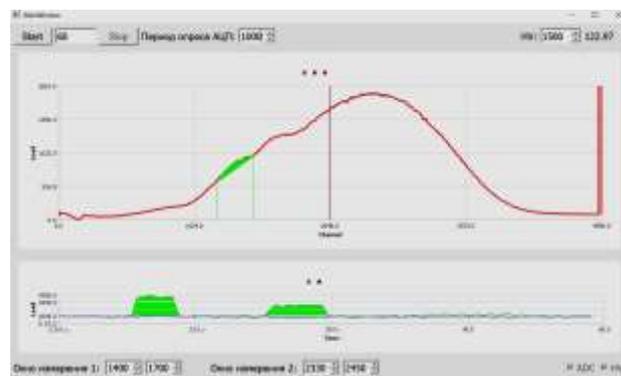


Рис. 5. Рабочее окно программы управления макетом

На рис. 5 представлено рабочее окно программы управления макетом. Она позволяет получить спектр в режиме реального времени, выделять на нем области, соответствующие интересующей нас аналитической линии и, в случае выполнения определенных условий (превышения сигнала над фоном) подавать управляющий сигнал на отсекающее устройство.

### IV. ВЫВОДЫ

Использование данной программы для отработки методики позволяет отследить влияние различных факторов (режимов работы источника излучения и детектора, концентрации анализируемого элемента) на получающийся спектр и подобрать наиболее оптимальные режимы работы.

Дальнейшие исследования будут направлены на отработку элементов рентгенооптической схемы и согласование взаимодействия отдельных узлов и блоков макета.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю., Жамова К.К., Староверов Н.Е., Холопова Е.Д. Способ оценки количественного содержания самородного золота в руде // Машиностроитель. 2016. № 1. С. 39-43.
- [2] Жамова К.К., Грязнов А.Ю., Бессонов В.Б. Способ рентгеноабсорбционной сепарации алмазов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 7. С. 8-14.
- [3] Пат. РФ № 2595826 / Н.Н. Потрахов, А.Ю. Грязнов, К.К. Жамова, В.Б. Бессонов, Н.Е. Староверов, Е.Д. Холопова. Способ определения количественного содержания самородного золота в руде; Опубл. 27.08.2016. Бюл. № 24.
- [4] Пат. РФ № 2470714 / Н.Н. Потрахов, Е.Н. Потрахов, А.Ю. Грязнов, К.К. Жамова, Л.М. Селиванов. Способ сепарации алмазов; Опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.