

# Геолого-геофизическое опробование железных руд гамма-альбедным методом

<sup>1</sup>\*ПАК Дмитрий Юрьевич, к.т.н., доцент, pak\_kargtu@mail.ru,

<sup>1</sup>ТЕБАЕВА Анар Юлаевна, магистр, преподаватель, anara.tebaeva@gmail.com,

<sup>1</sup>ПАК Юрий Николаевич, д.т.н., профессор, pak\_gos@mail.ru,

<sup>1</sup>НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** Стандартный способ опробования железных руд в силу высокой трудоемкости и низкой представительности не может служить основой для управления качеством руд в процессе их добычи и переработки. Предложенная спектрометрическая модификация гамма-альбедного способа позволяет исключить трудоемкие операции по измельчению руд, подготовке аналитических проб (~0,1 мм) и непосредственно химическому анализу на железо. Исследованиями спектрального распределения рассеянного гамма-излучения радиоизотопного источника Se-75 (~220 кэВ) на рудах с различным содержанием железа выявлены критические энергии и зоны их смещения в зависимости от качества руды и энергии рассеянного гамма-излучения. Найденные критические энергии в спектральном распределении альbedo гамма-излучения позволили выбрать оптимальные энергетические интервалы в жесткой (выше критической энергии) и мягкой (ниже критической энергии) областях спектра с точки зрения максимальной контрастности величины отношения  $\Psi$  интенсивностей рассеянного гамма-излучения, измеренных в выбранных энергетических интервалах, при изменении концентрации железа. В процессе испытаний предложенной модификации способа контроля содержания железа в частично подготовленных пробах массой ~ 60 кг, крупностью – 40 мм достигнута средняя квадратическая погрешность 1,32% абс.

**Ключевые слова:** геолого-геофизическое опробование, альbedo гамма-излучения, критические энергии в спектре, стандартный способ опробования, погрешность неоднородности железной руды, чувствительность метода, частично подготовленные пробы.

## Особенности стандартного способа опробования

Точность и достоверность радиоизотопного опробования обычно оценивают путем сопоставления его данных с результатами традиционного (стандартного) опробования, конечным этапом которого чаще всего является химический анализ железорудного материала на содержание железа. При таком подходе результаты стандартного опробования обычно принимаются за истинные. Отсюда действия исследователей направлены на минимизацию случайных расхождений инструментального метода с данными химического анализа с учетом допусков, принятых соответствующими стандартами [1-2]. Однако эти допуски распространяются лишь на конечный этап опробования.

Стандартный метод опробования железных руд характеризуется высокой трудоемкостью и сравнительно низкой представи-

тельностью. Это связано с тем, что процесс опробования предусматривает выполнение длительных операций: отбор первичных (точечных) проб от опробуемой партии руды; дробление объединенной пробы до крупности 40 мм, усреднение, сокращение и дробление до 10 мм и 3 мм; усреднение, сокращение и измельчение до крупности 0,16 мм; непосредственно химический анализ аналитических навесок на содержание железа.

Неоднородность руды создает проблему ее представительности, т.е. соответствия концентрации железа в отобранной пробе и опробуемой партии. Погрешность представительности опробования (неоднородность руды) – это погрешность, обусловленная тем, что содержание железа в пробе, подвергнутой непосредственно анализу может отличаться от его содержания в опробуемой партии.

Значительный вклад в погрешность

определения содержания железа при существующем опробовании железных руд, регламентированном Межгосударственным стандартом вносит погрешность представительности, которая формируется при отборе первичных проб от контролируемой партии материала [1]. Эта погрешность обусловлена сегрегационными явлениями и статистическими флуктуациями числа железосодержащих минеральных включений, попавших в первичную пробу. Для минимизации влияния сегрегации предусматривается формирование объединенной пробы из числа отобранных первичных проб. Для минимизации влияния статистической флуктуации предусматривается отбор точечных проб массой, выбираемой в зависимости от крупности.

### **Погрешности неоднородности руды на этапах опробования**

Исследованиями установлено, что наибольший вклад в общую погрешность стандартного опробования вносит отбор первичных проб [3-4]. Погрешность отбора  $\sigma_0$  характеризует разность между содержанием железа в контролируемой партии и объединенной пробе.

В процессе дробления исходной объединенной пробы и последующей подготовки пробы крупностью до 40 мм возникает погрешность  $\sigma_{п}$ , которая характеризует разность между содержанием железа в объединенной пробе и подготовленной пробе крупностью до 40 мм.

На последующих этапах опробования (измельчение, усреднение, сокращение и подготовка проб аналитической крупности возникает погрешность  $\sigma_{и}$ , которая характеризует разность между содержанием железа в подготовленной до 40 мм пробе и пробах аналитической крупности.

На завершающей стадии стандартного опробования возникает погрешность  $\sigma_x$ , характеризующая разность между результатами химического анализа аналитических навесок на содержание железа.

Таким образом, алгоритм отбора первичных проб и последующих этапов пробоподготовки должен обеспечить соответствие концентрации железа  $C_{Fe}$  в объединенной пробе его значению в опробуемой партии руды с погрешностью, не превышающей допускаемую стандартом.

Стандартный метод опробования регламентирует минимальную массу отбираемых первичных проб и их количество в зависимости от массы опробуемой партии руды, его крупности и величины вариации качества руды по содержанию железа. Важным моментом является отбор первичных проб. Опыт показывает, что в целом погрешность

опробования в большей степени зависит не от массы отбираемой первичной пробы, а от числа проб, слагающих объединенную пробу. В общем случае содержание железа  $C_{Fe}$  в объединенной пробе будет отличаться от истинного содержания железа в опробуемой партии руды.

Среднее квадратическое отклонение концентрации железа в точечных пробах от концентрации железа в опробуемой партии руды можно принять в качестве параметра, характеризующего погрешность отбора  $\sigma_0$  за счет неоднородности.

Величина вариации качества для железных руд Лисаковского месторождения (Казахстан), оцененная согласно ГОСТ, составила 2,42%.

При опробовании партии руды массой до 500 тонн и величиной вариации качества, равной 2,42%, найдены оптимальные параметры опробования: минимальная масса точечных проб – 8 кг; минимальное число точечных проб – 29; масса объединенной пробы – 232 кг.

В процессе пробоподготовки наряду с дроблением и измельчением обязательной операцией является перемешивание и сокращение пробы. ГОСТ [1] регламентирует минимально необходимую массу пробы  $m$  после сокращения в зависимости от крупности и вариации качества руды

За размер максимального куска принимают размер отверстия сита, на котором после окончания отсева остается не более 5% материала.

Для руды большой вариации качества и крупности до 40 мм необходимая масса пробы  $m$  составила 160 кг.

Среднее квадратическое отклонение  $C_{Fe}$  в пробах дробления до 40 мм от концентрации железа в объединенной пробе характеризует погрешность неоднородности руды на данном этапе пробоподготовки. Эта погрешность  $\sigma_{п}$ , оцененная по расхождению концентрации железа в пробах данного класса крупности, составила 1,26%. Аналогичный подход использован при оценке неоднородности на последующем этапе опробования (измельчение, перемешивание, сокращение и подготовка проб аналитической крупности проб (~0,16 мм)). Погрешность на этой стадии пробоподготовки  $\sigma_{и}$  составила 0,84%.

Погрешность завершающего этапа опробования, характеризующего расхождение результатов химического анализа аналитических навесок, составила 0,5%. Количественные результаты о составляющих погрешностей получены в процессе исследований, выполненных в соответствии с указанными ГОСТами.

Таким образом, общая погрешность стан-

дартного способа опробования, оцененная с учетом отдельных составляющих ( $\sigma_0 = 2,42\%$ ,  $\sigma_n = 1,26\%$ ,  $\sigma_{и} = 0,84\%$ ,  $\sigma_x = 0,5\%$ ), составила 2,9% абс.

### Постановка задачи

Проблемы обеспечения необходимой точности и достоверности традиционных способов опробования особенно актуальны в связи с интенсивным развитием инструментальных ядерно-геофизических методов контроля качества различных сырьевых материалов [5-8]. При этом метрологические характеристики инструментальных методов оценивают, как правило, простым сопоставлением результатов инструментального и химического анализа, необоснованно пренебрегая весомыми погрешностями на трудоемких этапах традиционного опробования. В этой связи погрешность стандартного способа опробования следует рассматривать как допустимый предел точности инструментальных методов. Поэтому оценку точности и достоверности ядерных методов опробования нельзя осуществлять путем прямого сопоставления их данных с результатами химического анализа.

Цель исследования – совершенствование существующей системы стандартного опробования железных руд в направлении снижения трудоемкости, повышения оперативности и точности получения представительной информации о качестве железных руд в больших массах.

Снижение трудоемкости осуществляется за счет исключения ряда операций стандартного опробования (дробление, измельчение, сокращение и подготовка проб аналитической крупности).

Повышение точности и представительности достигается путем определения концентрации железа в частично подготовленных пробах большой массы глубинным гамма-альбедным методом, позволяющим за счет оптимизации принципа спектрометрии рассеянного гамма-излучения обеспечить повышение чувствительности к железу.

Гамма-альбедный метод (в геолого-геофизической практике его называют гамма-гамма методом) благодаря относительной простоте нашел широкое применение в геолого-геофизических исследованиях и горно-металлургической отрасли [3, 5, 6]. Интенсивность рассеянного гамма-излучения, являющаяся основной метрологической характеристикой данного метода в общем случае зависит от эффективного атомного номера среды, энергии первичного гамма-излучения и геометрических условий измерения. Выбор энергии первичного гамма-излучения осуществляется в зави-

симости от поставленной задачи и объекта опробования (определение  $C_{Fe}$  в порошковой пробе, отбитой горной массе, условиях естественного залегания пород) с точки зрения обеспечения максимальной чувствительности к железу, максимальной глубинности (представительности) исследования и минимального влияния гранулометрического состава.

В зависимости от вещественного и гранулометрического состава опробуемых руд, устойчивости взаимосвязи между эффективным атомным номером и содержанием железа, диапазона вариации  $C_{Fe}$  и плотности руды применяются различные методические подходы и модификации гамма-альбедного способа, учитывающие особенности инверсионных зависимостей и многократного рассеяния полиэнергетического гамма-излучения, угловые и линейные характеристики зондовых устройств [5,6].

Известны примеры определения  $C_{Fe}$  в подготовленных пробах класса – 3 мм гамма-альбедным методом. Погрешность не превышает 0,5% при массе пробы около 1 кг [7]. Гамма-альбедное опробование вагонов с применением жесткого гамма-излучения Cs-137 (661 кэВ) малоэффективно в силу слабой чувствительности к железу и низкой представительности опробования. Учитывая габариты вагона, значительная масса опробуемой руды оказывается вне зоны эффективного контроля. Любой инструментальный способ опробования следует считать эффективным, если его результаты распространяются на весь объем контролируемой руды.

Разнообразие факторов, влияющих на метрологические характеристики опробования, актуализирует выбор оптимальной энергии первичного гамма-излучения с точки зрения максимальной чувствительности к железу и минимальной чувствительности к помехам. В данном случае помехой служит крупность руды, дисперсия которой создает неоднородность.

### Результаты исследований спектрометрии рассеянного гамма-излучения

Исследованиями рассеянного гамма-излучения установлено, что зависимость относительной чувствительности метода к эффективному атомному номеру  $S_z$  от величины  $Z$  носит инверсионный характер [9]. Причем область инверсии (максимума  $S_z$ ) сдвигается в область повышенных значений эффективного атомного номера при увеличении энергии первичного гамма-излучения. Погрешность за счет неоднородности опробуемой руды (крупности) сложным образом зависит от диаметра частиц (вариации крупности), состава руды и глубинности метода [10]. В

общем случае погрешность за счет вариации крупности имеет инверсионный от энергии первичного гамма-излучения характер для конкретного диаметра частиц. Максимальная погрешность наблюдается при глубинности метода (энергия гамма-излучения,  $Z$  руды), соизмеримой с размером частиц.

Неконтролируемые флуктуации размера частиц вносят погрешность в результаты метода.

Таким образом, для достижения минимальной погрешности за счет неоднородности (крупности) оптимальную энергию первичного гамма-излучения следует выбирать по минимуму отношения  $S_d/S_{Fe}$  чувствительностей к крупности и железу. Эти рекомендации предопределили возможность экспресс-опробования железных руд в больших массах гамма-альбедным способом.

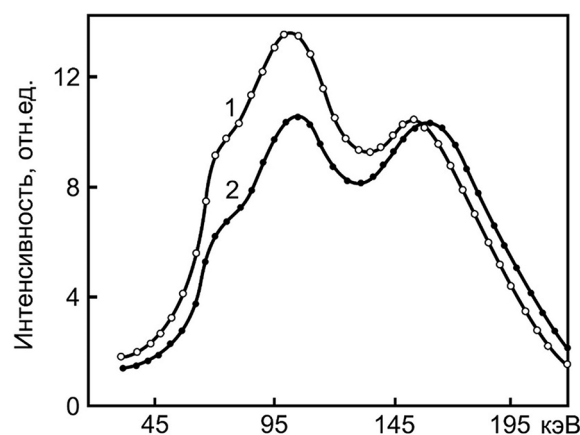
Для минимизации возмущающего влияния крупности выбирается энергия первичного гамма-излучения, при которой глубинность метода значительно превышает максимальный размер частиц. Гамма-альбедный метод, реализованный с помощью радиоизотопного источника  $Se-75$  (~220 кэВ), обеспечивает глубинность исследований около 14 см, что более чем в 3 раза превышает максимальный размер частиц в подготовленных пробах.

Сравнительно невысокая чувствительность спектрометрической модификации гамма-альбедного метода объясняется выбором неоптимальных параметров измерений, при которых наблюдается одинаковый качественный характер изменения интенсивности в нормируемых областях спектра при изменении концентрации железа в руде.

Нами исследованы особенности спектрального распределения альбеда полиэнергетического гамма-излучения  $Se-75$  в зависимости от параметров зонда и концентрации железа в руде.

Спектральное распределение рассеянного гамма-излучения изучено на контрольно-эталонировочных пробах с содержанием железа 29,7% и 49,3% при различных значениях длины зонда  $L$  и расстояния  $H$  от зонда до поверхности руды.

На рисунке 1 представлены аппаратные спектры рассеянного гамма-излучения от эталонных проб с различной концентрацией железа. Спектры получены при параметрах  $L$  и  $H$ , обеспечивающих инверсионный характер в поведении интенсивностей рассеянного гамма-излучения в различных энергетических интервалах спектра. Жесткий пик в спектре обусловлен преимущественно однократно рассеянием гамма-квантов с энергией 265 кэВ, выход которых на 1 распад составляет 56%.



1, 2 – содержание железа 29,7 и 49,3%

**Рисунок 1 – Аппаратурные спектры рассеянного гамма-излучения руд**

Смещение критической энергии в зависимости от концентрации железа в руде вызвано изменением среднего угла рассеяния первичного гамма-излучения и интенсивным фотоэлектрическим поглощением более низкоэнергетического гамма-излучения при увеличении концентрации железа.

Инверсионный характер в поведении мягкой и жесткой составляющих спектра при изменении концентрации железа наблюдается при характеристиках зонда  $L$  и  $H$  (меняется средний угол рассеяния), при которых критические энергии – максимумы в спектре находятся в энергетических интервалах (90-110) кэВ и (145-160) кэВ. Это объясняется преобладающей ролью фотоэлектрического поглощения гамма-излучения с энергией менее ~100 кэВ для железа и преобладающей ролью комптоновского рассеяния для гамма-излучения с энергией выше ~150 кэВ.

Последовательно меняя параметры зонда  $H$ ,  $L$ , измеряли энергетические спектры рассеянного от эталонных проб гамма-излучения. Путем машинной обработки измеренных спектров построены зависимости относительной чувствительности  $S_{Fe}$  к железу от энергии (рисунок 2). Шаг квантования энергии и ширина энергетического окна выбраны равными 25 кэВ. Относительная чувствительность  $S_{Fe}$  оценивается как относительное приращение измеренной интенсивности при единичном изменении содержания железа.

Зависимость относительной чувствительности к железу  $S_{Fe}$  от энергии носит инверсионный знакопеременный характер. Максимальная чувствительность наблюдается в области максимума интенсивности (критической энергии).

При энергии выше ~140 кэВ (в зависи-

мости от  $H$ ) чувствительность меняет знак. С увеличением содержания железа интенсивность рассеянного гамма-излучения возрастает. Причем с уменьшением воздушного зазора  $H$  область нулевой чувствительности наступает при больших значениях энергии рассеянного гамма-излучения.

Оптимальные энергетические интервалы в мягкой области спектра (75-110) кэВ и жесткой области спектра (180-215) кэВ обеспечивают максимальную контрастность величины отношения интенсивностей рассеянного гамма-излучения, измеренных в выбранных энергетических интервалах спектра.

Чувствительность спектрометрического гамма-альбедного метода к железу в зависимости от параметров зонда  $L$  и  $H$  показана на рисунке 3. Выбраны оптимальные параметры измерений:  $L = 18$  см и  $H = 2$  см. При выбранных параметрах зонда и оптимальных энергетических интервалах относительная чувствительность предлагаемого метода к железу составила 2,86 проц./%.

Сравнительно высокая чувствительность позволила обеспечить удовлетворительную точность оценки качества руд по спектрометрии рассеянного гамма-излучения с источником  $Se-75$ .

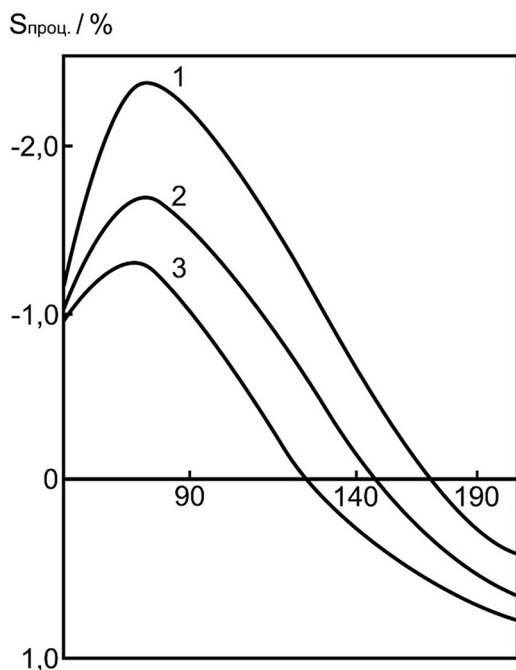
В процессе опробования и анализа 18 частично подготовленных проб железных

руд класса – 40 мм и массой около 60 кг в диапазоне изменения концентрации железа 32-49% достигнута средняя квадратическая погрешность определения железа 1,32% абс. Относительная статистическая погрешность при выбранном времени 7 минут составила менее 1%.

Для оценки достоверности предлагаемого инструментального способа опробования проведены дополнительные исследования неоднородности опробуемой руды на этапе подготовки проб класса – 40 мм. Относительное среднее квадратическое расхождение величины отношения  $\Psi$  при 20 контрольных измерений составило 4,12%, что адекватно средней квадратической погрешности 1,44% абс. по железу. Эти результаты находятся в удовлетворительном согласии с ранее полученной погрешностью 1,26% абс. на данном этапе стандартного опробования.

### Заключение

Исследованы особенности существующей системы стандартного опробования железных руд с точки зрения их неоднородности и погрешностей на различных этапах опробования. Предложена новая спектрометрическая модификация гамма-альбедного способа контроля содержания железа в частично подготовленных пробах массой около 60 кг, позволяющая исключить трудоемкие этапы



1, 2, 3 –  $H = 2$ ; 4; 7 см

Рисунок 2 – Зависимость относительной чувствительности к железу от энергии регистрируемых гамма-квантов

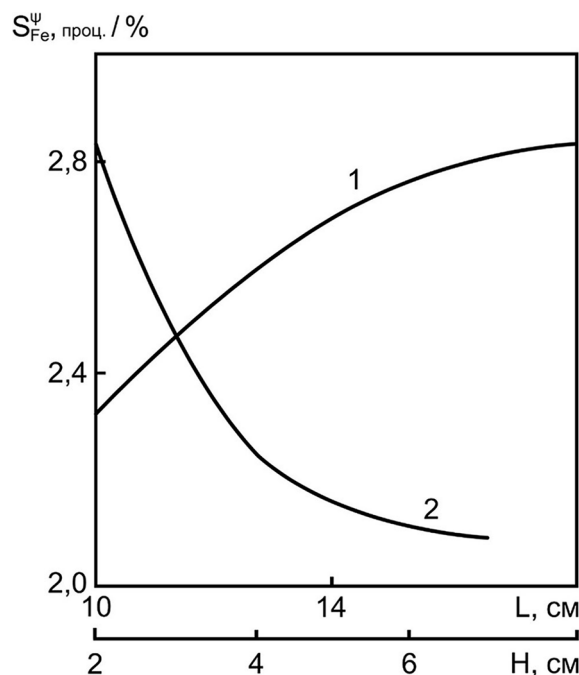


Рисунок 3 – Зависимость относительной чувствительности метода к железу: 1 – от длины зонда ( $H = 2$  см), 2 – от высоты  $H$  ( $L = 18$  см)

измельчения, подготовки аналитических проб и непосредственно химического анализа. Установленный инверсионный, знакопеременный характер чувствительности к железу от энергии рассеянного гамма-излучения позволяет оптимизировать параметры контроля (энергетические интервалы и характеристики зонда), обеспечивающие максимальную чувствительность предложенной модификации способа к железу. В процессе лабораторных испытаний разработанной модификации способа опробования железных руд класса – 40 мм в диапазоне изменения

концентрации железа 32-49% средняя квадратическая погрешность определения концентрации железа составила 1,32% абс. Достоверность полученных данных о точности опробования подтверждена результатами дополнительного исследования неоднородности руды на рекомендуемом этапе опробования частично подготовленных проб.

*Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19678770).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межгосударственный стандарт ГОСТ 15054-80. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для химического анализа / ИПК. М.: Издательство стандартов. 1999.
2. ГОСТ 53657-2009. Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Метод определения железа в пересчете на оксид. – М.: Стандартинформ, 2010.
3. Боченин В.И. Радиоизотопный контроль качества в металлургии. – М.: Металлургия, 1988. 215 с.
4. Плинер Ю.Л., Винник В.И., Семенко М.Г. и др. Метрологическое обеспечение контроля состава материалов горной металлургии: Справочник. – М.: Металлургия, 1988. 288 с.
5. Pak Y., Pak D. Nuclear technologies in geologic-geophysical studies. – Karaganda. KSTU. 2017. – 321 p.
6. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. – М.: Атомиздат, 1980. 321 с.
7. Большаков А.Ю. Системы ядерно-физического опробования для управления качеством руд. – Л.: Недра, 1979. 188 с.
8. Шестаков В.В. Ядерно-геофизический экспресс-анализ транспортируемых руд и ресурсосберегающие технологии. – Свердловск, 1987. 112 с.
9. Пак Ю.Н., Вдовкин А.В. Расчет чувствительности определения эффективного атомного номера сложных сред по альбедо гамма-излучения // Атомная энергия. Т. 74. Вып. 6. 1993.
10. Pak Y.N., Vdovkin A.V. Borodachyov A.D. The effect of heterogeneity in gamma-ray albedo analysis of mineral raw materials. Applied Radiation and Isotopes 54 (2001), 509-517.

### **Гамма-альбед әдісі бойынша темір кендерінің геологиялық-геофизикалық сынамаларын алу**

<sup>1</sup>\*ПАК Дмитрий Юрьевич, т.ғ.к., доцент, pak\_kargtu@mail.ru,

<sup>1</sup>ТЕБАЕВА Анар Юлаевна, магистр, оқытушы, anara.tebaeva@gmail.com,

<sup>1</sup>ПАК Юрий Николаевич, т.ғ.д., профессор, pak\_gos@mail.ru,

<sup>1</sup>«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Темір рудаларын сынаудың стандартты әдісі өзінің жоғары еңбек сыйымдылығына және төмен репрезентативтілігіне байланысты кендерді өндіру және өңдеу процесін-

де олардың сапасын бақылау үшін негіз бола алмайды. Гамма-альбедо әдісінің ұсынылып отырған спектрометриялық модификациясы кендерді ұнтақтау, аналитикалық үлгілерді (~0,1 мм) дайындау және темірге тікелей химиялық талдау жүргізу бойынша көп еңбекті қажет ететін операцияларды болдырмауға мүмкіндік береді. Se-75 (~220 кэВ) радиоизотоптық көзінің шашыраңқы гамма-сәулеленуінің құрамында темірі әртүрлі кендерде спектрлік таралуын зерттеу кеннің сапасына және шашыраңқы гамма энергиясына байланысты сыни энергиялар мен олардың ығысу аймақтарын анықтады. Гамма-сәулелену альбедосының спектрлік таралуындағы табылған критикалық энергиялар максималды контраст тұрғысынан спектрдің қатты (критикалық энергиядан жоғары) және жұмсақ (критикалық энергиядан төмен) аймақтарында оңтайлы энергия интервалдарын таңдауға мүмкіндік берді.  $\Psi$  қатынасы шашыраған гамма-сәулелену қарқындылығы таңдалған энергетикалық интервалдарда өлшенген, темір концентрациясының өзгеруімен. Салмағы ~ 60 кг, бөлшектерінің өлшемі 40 мм болатын ішінара дайындалған үлгілердегі темір құрамын бақылау әдісінің ұсынылған модификациясын сынау процесінде 1,32% абс. орташа квадраттық қатеге қол жеткізілді.

**Кілт сөздер:** геологиялық және геофизикалық сынамалар, гамма-сәулелік альбедо, спектрдегі критикалық энергиялар, стандартты сынама алу әдісі, темір рудасының гетерогенділік қателігі, әдіс сезімталдығы, жартылай дайындалған үлгілер.

### **Geological and Geophysical Sampling of Iron Ores by the Gamma-albed Method**

<sup>1</sup>**PAK Dmitri**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, pak\_kargtu@mail.ru,

<sup>1</sup>**TEBAYEVA Anar**, Master's Degree, Lecturer, anara.tebaeva@gmail.com,

<sup>1</sup>**PAK Yuri**, Dr. of Tech. Sci., Professor, pak\_gos@mail.ru,

<sup>1</sup>NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

\*corresponding author.

**Abstract.** The standard method of testing iron ores, due to its high labor intensity and low representativeness, cannot serve as a basis for controlling the quality of ores in the process of their extraction and processing. The proposed spectrometric modification of the gamma-albedo method makes it possible to exclude labor-intensive operations for grinding ores, preparing analytical samples (~0.1 mm) and directly chemical analysis for iron. Studies of the spectral distribution of the scattered gamma radiation of the radioisotope source Se-75 (~220 keV) on ores with different iron content revealed critical energies and zones of their displacement depending on the quality of the ore and the energy of the scattered gamma radiation. The found critical energies in the spectral distribution of the albedo of gamma radiation made it possible to choose the optimal energy intervals in the hard (above the critical energy) and soft (below the critical energy) regions of the spectrum in terms of the maximum contrast ratio  $\Psi$  of the scattered gamma radiation intensities measured in the selected energy intervals, with a change in the concentration of iron. In the process of testing the proposed modification of the method for monitoring the iron content in partially prepared samples weighing ~ 60 kg, with a particle size of 40 mm, a root-mean-square error of 1.32% abs was achieved.

**Keywords:** geological and geophysical sampling, gamma-ray albedo, critical energies in the spectrum, standard sampling method, iron ore heterogeneity error, method sensitivity, partially prepared samples.

**REFERENCES**

1. Mezhgosudarstvennyj standart GOST 15054-80. Rudy zheleznye, koncentraty, aglomeraty i okatyshi. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo analiza / IPK. Moscow: Izdatel'stvo standartov. 1999.
2. GOST 53657-2009. Rudy zheleznye, koncentraty, aglomeraty i okatyshi. Metod opredeleniya zheleza v pereschete na oksid. – Moscow: Standartinform, 2010.
3. Bochenin V.I. Radioizotopnyj kontrol' kontrol' kachestva v metallurgii. – Moscow: Metallurgiya, 1988. 215 p.
4. Pliner Yu.L., Vinnik V.I., Semenko M.G. i dr. Metrologicheskoe obespechenie kontrolya sostava materialov gornoj metallurgii: Spravochnik. – Moscow: Metallurgiya, 1988. 288 p.
5. Pak Y., Pak D. Nuclear technologies in geologic-geophysical studies. – Karaganda. KSTU. 2017. – 321 p.
6. Arcybashev V.A. Yaderno-geofizicheskaya razvedka. – Moscow: Atomizdat, 1980. 321 p.
7. Bol'shakov A.Y. Sistemy yaderno-fizicheskogo oprobovaniya dlya upravleniya kachestvom rud. – Leningrad: Nedra, 1979. 188 p.
8. Shestakov V.V. Yaderno-geofizicheskij ekspress-analiz transportiruemyh rud i resursosberegayushchie tekhnologii. – Sverdlovsk, 1987. 112 p.
9. Pak Yu.N., Vdovkin A.V. Raschet chuvstvitel'nosti opredeleniya effektivnogo atomnogo nomera slozhnyh sred po al'bedo gamma-izlucheniya // Atomnaya energiya. T. 74. Vyp. 6. 1993.
10. Pak Y.N., Vdovkin A.V. Borodachyov A.D. The effect of heterogeneity in gamma-ray albedo analysis of mineral raw materials. Applied Radiation and Isotopes 54 (2001), 509-517.