

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА МАТЕРИАЛОВ НА КОНВЕЙЕРЕ

*В. Ю. Алексахин^{а,б}, Е. И. Андреев^а, И. К. Комаров^а,
Е. А. Разинков^{а,б,1}, Ю. Н. Рогов^{а,б}, М. Г. Сапожников^{а,б}*

^а ООО «Диамант», Дубна, 141980, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Обсуждаются результаты применения метода меченых нейтронов для проведения дистанционного неразрушающего анализа элементного состава вещества на конвейере. Метод меченых нейтронов состоит в облучении исследуемого вещества быстрыми нейтронами с энергией 14,1 МэВ с последующей регистрацией характеристического излучения гамма-квантов. Меченые нейтроны осуществляется α -детектором, встроенным в нейтронный генератор.

The results of application of the tagged neutron method for remote non-destructive analysis of elemental composition of matter on a conveyor are discussed. The method of tagged neutrons consists in irradiation of the investigated substance by fast neutrons with energy of 14.1 MeV, with subsequent registration of characteristic gamma-quantum radiation. The tagged neutrons are detected by an alpha detector built into the neutron generator.

PACS: 28.20.Pr; 61.05.Tv

ВВЕДЕНИЕ

Метод меченых нейтронов (ММН) широко используется для дистанционного неразрушающего анализа элементного состава различных объектов [1–4]. В настоящей статье обсуждаются результаты измерений различных веществ на экспериментальном стенде, созданном для изучения возможностей ММН для определения элементного состава минерального сырья, транспортируемого на конвейере. В качестве объектов для изучения были выбраны пробы магнетитовой, титаномагнетитовой и полиметаллической (Pb, Zn) руды.

Экспериментальный стенд был сделан для оценки характеристик создаваемого конвейерного анализатора на основе ММН. Интерес к таким приборам возник из-за их способности получать информацию об элементном составе вещества на конвейере в режиме реального времени. Это делает конвейерный анализатор необходимым датчиком для всех систем автоматизации и цифровизации на производстве.

¹E-mail: erazinkov@diamant-sk.ru

1. МЕТОД МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

Метод меченых нейтронов основан на облучении исследуемого образца быстрыми нейтронами с энергией 14,1 МэВ, образующимися в результате реакции



Поскольку, как правило, энергия налетающего дейтрона составляет порядка 60–100 кэВ, α -частица и нейтрон разлетаются практически в противоположные стороны. (При энергии дейтрона 100 кэВ угол разлета между нейтроном и α -частицей меняется в узком интервале от 172 до 180°.) Поэтому, регистрируя направление импульса α -частицы, можно определить направление импульса нейтрона. Такая процедура называется мечением нейтронов (рис. 1).

Быстрые нейтроны с энергией 14,1 МэВ, в основном, за счет реакций неупругого рассеяния типа $(n, n'\gamma)$ возбуждают ядра исследуемого вещества. Это возбуждение снимается γ -излучением, характерным для каждого химического элемента, что делает возможным его идентификацию.

Регистрация γ -квантов осуществляется только внутри окна совпадений, которое открывается в момент появления сигнала от α -частицы в α -детекторе. Таким образом отбираются только те γ -кванты, которые испущены ядрами исследуемого вещества при взаимодействии с мечеными нейтронами. В результате по сравнению со стандартными методами нейтронного активационного анализа под действием быстрых или тепловых нейтронов соотношение сигнал/фон в ММН возрастает почти в 200 раз (см. подробное обсуждение в [3]).

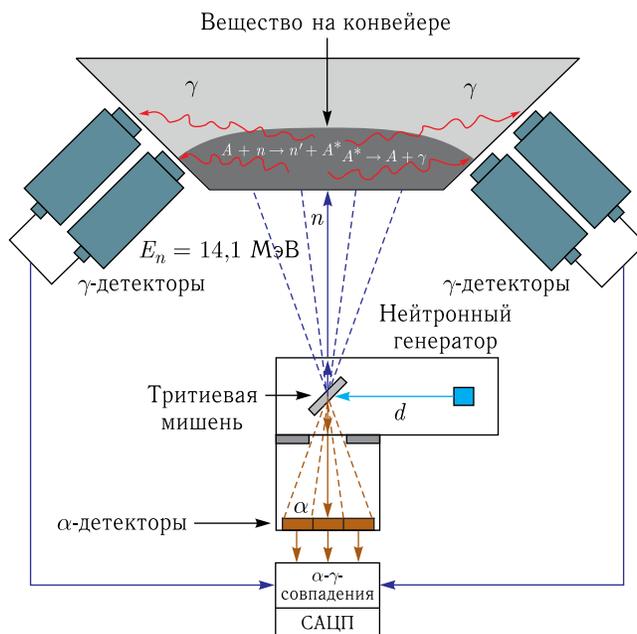


Рис. 1. Схема метода меченых нейтронов

В сравнении с рентгеновскими методами, которые дают сведения только об элементном составе поверхностного слоя вещества толщиной в несколько миллиметров, ММН имеет большую проникающую способность и позволяет проводить анализ материала на ленте конвейера толщиной до 300 мм. Этим ММН выгодно отличается от рентгеновских методов.

В настоящее время ММН [1–4] позволяет определять концентрации 25 элементов: Na, Mg, N, C, O, F, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb, Sn, Bi, Sb.

ММН дает уникальную возможность прямого определения концентрации легких элементов — углерода, азота, фосфора и кислорода. Благодаря знанию концентрации кислорода возможно определять концентрации элементов в сырье при различной влажности. В работе [5] было показано, что элементные концентрации сухой и влажной руды, измеренные ММН, совпадают вплоть до влажности 20%.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ РАБОТЫ

Исследования проводились на экспериментальном стенде, который полностью имитирует работу конвейерного анализатора горных пород АГП-К. В состав стенда входит перемещаемая модель конвейера, нейтронный модуль, два блока γ -детекторов по 7 γ -детекторов каждый, шкаф управления и АРМ оператора. Общая схема стенда показана на рис. 2.

Перемещаемая модель конвейера представляет собой металлический каркас, на который натягивается резиновая конвейерная лента 1200-5-ТК-200-2-6-Г-1-Р5 шириной 1200 мм и толщиной 16 мм. Длина каркаса составляет 4 м, он передвигается относительно неподвижного блока нейтронного модуля с помощью электродвигателя.

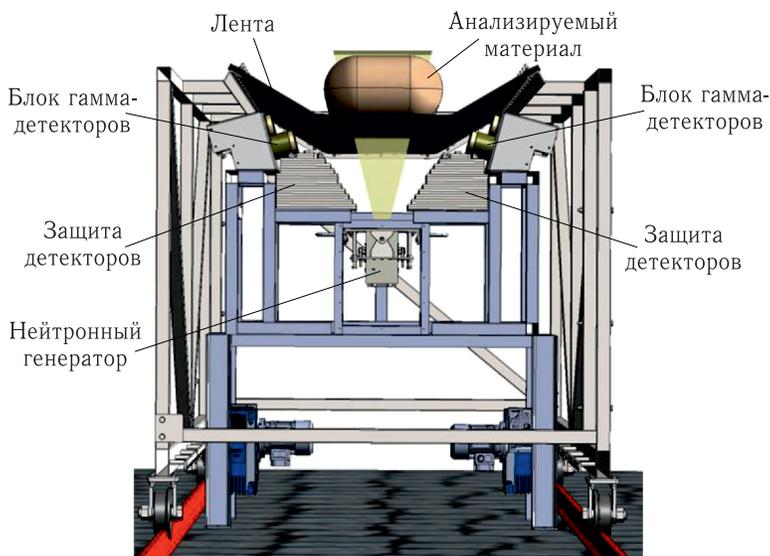


Рис. 2. Общая схема экспериментального стенда

Нейтронный модуль состоит из портативного нейтронного генератора ИНГ-27 со встроенным 9-пиксельным α -детектором, системы из 14 γ -детекторов на основе кристалла BGO и защиты γ -детекторов.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 излучает нейтроны с энергией 14,1 МэВ. Интенсивность нейтронного потока составляла $I = 5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Встроенный кремниевый α -детектор представлял собой матрицу 3×3 с размером пикселя 10×10 мм. Это позволяло облучать объект 9 мечеными пучками. Для увеличения статистики далее мы будем рассматривать суммарные энергетические и временные распределения по всем 9 пучкам. Расстояние от тритиевой мишени до α -детектора составляло 62 мм.

Для регистрации γ -квантов, возникающих при облучении минерального сырья пучком быстрых меченых нейтронов, использовались 14 γ -детекторов на основе кристаллов BGO диаметром 76 мм и толщиной 65 мм. Гамма-детекторы защищались от прямого попадания нейтронов железной защитой толщиной 313 мм. Детекторы γ -квантов на основе BGO, применяемые на установке, имеют достаточно хорошее энергетическое разрешение, не хуже 10% на линии $E_\gamma = 662 \text{ кэВ}$ от радиоактивного источника ^{137}Cs .

Энергетическое разрешение всей системы детекторов составило $\Gamma_E = (4,42 \pm \pm 0,14) \%$ на линии 4,44 МэВ. Временное разрешение системы (α - γ)-совпадений, усредненное по всей совокупности γ -детекторов, составило $\Gamma_t = (4,82 \pm 0,12) \text{ нс}$.

Блоки γ -детекторов размещены по обеим сторонам от ленты конвейера. Общий вид стенда показан на рис. 3.

Расстояние от источника нейтронов до ленты стенда составляло 562 мм. Расстояние от центра пробы до гамма-детекторов варьировалось от 425 до 509 мм.



Рис. 3. Общий вид экспериментального стенда

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим работу установки на примере измерений энергетических спектров γ -квантов следующих типов руды: магнезита, титаномagnetитовой и свинцово-цинковой руды. Обработка спектров проводилась по методике, которая была подробно изложена в [5–7].

3.1. Измерения магнезита. Для измерений использовались 9 проб сырого магнезита, предоставленных ООО «Магнезит», с известным химическим составом. Масса каждой пробы составляла от 26 до 32 кг, крупность проб — 40 мм.

Проба выкладывалась на конвейерную ленту и измерялась в том виде, в каком она была получена после транспортировки, без какой-либо пробоподготовки (сушки, дробления). Пучок меченых нейтронов облучал пробу через ленту, как это делается на реальном конвейере. Измерения проводились в статическом режиме, т. е. положение пробы во время измерения не менялось.

На рис. 4 показано типичное временное распределение сигналов от γ -квантов. Спектр набран в окне совпадений шириной 200 нс, которое открывается в момент прихода α -частицы. Видно, что временной спектр состоит из плато случайных совпадений и пика γ -квантов от исследуемого объекта. Нулевая точка отсчета выбирается на временном спектре так, чтобы совпадать с максимумом пика сигналов от исследуемого объекта. Видно также, что пик сигнала от объекта не является чистым гауссианом, а имеет наплыв событий справа от положения максимума. Они возникают из-за взаимодействия нейтронов, отраженных от материала пробы, с веществом γ -детекторов. Для дальнейшего анализа отбирались события, которые лежат во временном диапазоне ± 3 нс от максимума пика (см. рис. 4).

Как видно из рис. 4, в область ± 3 нс от максимума попадают и события от фона случайных совпадений. Большим преимуществом ММН является возможность точного учета фона случайных совпадений за счет измерения временного спектра γ -квантов. Для этого выбирается окно в спектре на рис. 4 шириной в 20 нс, отстоящее от основного пика сигналов на 20 нс. События внутри этого окна определяют энер-

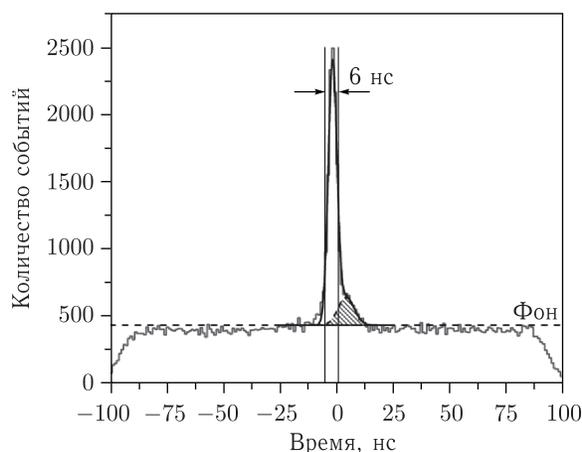


Рис. 4. Временной спектр γ -квантов

гетический фон от случайных совпадений, который вычитается из основного спектра в области ± 3 нс от максимума.

Кроме фона случайных совпадений необходимо учитывать фон от ленты конвейера, который измеряется при отсутствии пробы на ленте конвейера.

На рис. 5 показан энергетический спектр γ -квантов из области сигналов от пробы магнезита. γ -спектр каждого образца раскладывался на отдельные составляющие путем подгонки его суммой опорных γ -спектров от элементов, входящих в состав образца. Все спектры исходных элементов Al, C, Ca, Fe, K, Mg, Na, O, Si, Ti, Pb, S, Zп были измерены предварительно.

Энергетический спектр γ -квантов от облучения образца быстрыми нейтронами с энергией 14,1 МэВ представляется в виде суммы спектров отдельных γ -линий, спектра континуума и спектра фона:

$$F(E) = \sum_j N_j \left(\sum_{i=1}^{i=n_j} \sigma_{ij}(E) P_{ij}(E) + R_j^{\text{cont}} F_j^{\text{cont}}(E) \right) + BG(E), \quad (2)$$

где N_j — параметр, определяющий содержание элемента j в образце, этот параметр пропорционален числу атомов элемента в образце и является единым для всех γ -линий i элемента j ; n_j — количество γ -линий i у элемента j ; $\sigma_{ij}(E)$ — сечение рождения γ -квантов с энергией E , соответствующей γ -линии i , при взаимодействии нейтрона с элементом j ; P_{ij} — функция отклика γ -детектора, соответствующая γ -линии i элемента j ; $F_j^{\text{cont}}(E)$ — амплитуда спектра континуума, который наблюдается при высоких энергиях возбуждения практически для всех ядер, кроме легчайших; R_j^{cont} — нормировочный коэффициент для спектра континуума; $BG(E) = A \exp(-BE)$ — функция фона, A и B — параметры подгонки (фита).

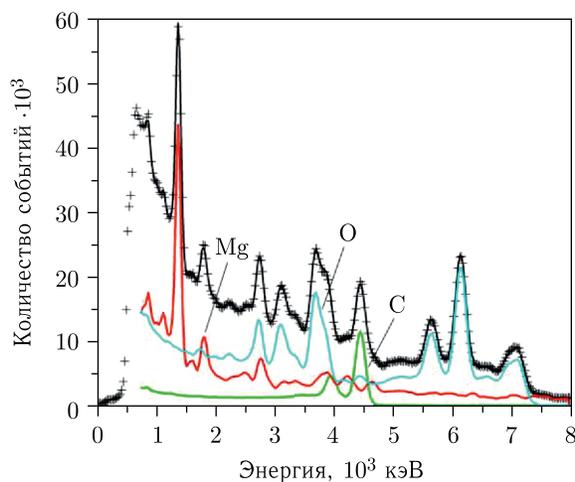


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Энергетический спектр γ -квантов образца магнезита. Сплошная черная линия — сумма вкладов всех элементов. Вклады отдельных элементов показаны цветом: кислорода — голубым, углерода — зеленым, магния — красным; крестиками — экспериментальные данные

Процедура обработки спектров подробно изложена в [5]. Зная относительные доли элементов в образце $v_j = N_j / \sum_j N_i$ и предполагая соблюдение соотношения $\sum_j v_j = 1$, можно вычислить массовые доли элементов в образце как

$$w_j = \frac{v_j m_j}{\sum_i v_i m_i}, \quad (3)$$

где m_j — атомный вес элемента j .

Для вычисления массовых долей оксидов элементов W_j определим массовую долю r_j элемента j в оксиде, формула которого в общем виде может быть представлена как $J_x O_y$:

$$r_j = \frac{x m_j}{x m_j + y m_0}. \quad (4)$$

Тогда W_j есть

$$W_j = \frac{(v_j m_j) / r_j}{\sum_j (v_j m_j) / r_j}. \quad (5)$$

Важным вопросом является учет фона, возникающего от взаимодействия нейтронов с материалами конструкции анализатора. Они расположены намного ближе к источнику нейтронов, масса их также больше или сравнима с массой образца, поэтому очень существен вопрос об искажениях, которые вносят материалы конструкции анализатора в определение массовой концентрации различных элементов и, в особенности, железа общего. Здесь хорошо проявляются преимущества метода меченых нейтронов, позволяющие корректно оценить энергетический спектр окружающего фона и вычесть его из результирующего распределения.

Рассмотрим процесс учета фона установки на примере анализа образца сахара. На рис. 6 показан энергетический спектр пробы сахара массой 20 кг до (зеленая линия, 1) и после вычитания фона (черная линия, 2) от окружающей среды.

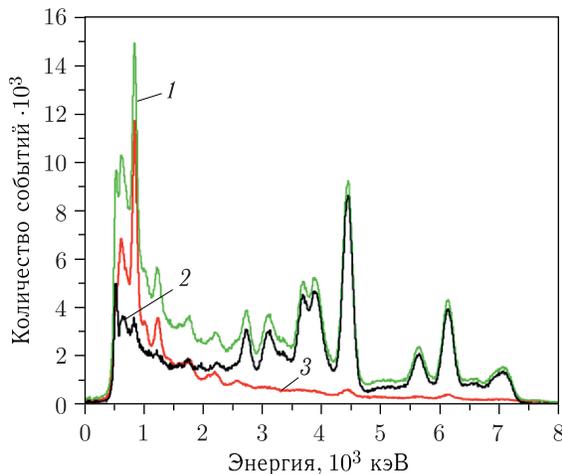


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Сравнение энергетического спектра γ -квантов образца сахара до вычета фона (зеленая линия, 1), после вычета фона (черная линия, 2) и спектра фона случайных совпадений (красная линия, 3)

Хорошо видно, что в спектре до вычета фона (зеленая линия, 1), который соответствует области временного спектра ± 3 нс от максимума сигнала, показанной на рис. 4, видны мощные пики от линии железа 840 и 1230 кэВ. Однако ММН дает возможность корректно измерить фон случайных совпадений. Для этого, как описано выше, отбираются события в области временного спектра на рис. 4, отстоящей на 20 нс от максимума сигнала. Энергетический спектр таких фоновых событий показан красной линией (3) на рис. 6. В этом спектре также доминируют линии железа 840 и 1230 кэВ. После вычитания этого фонового спектра в результирующем спектре сахара (черная линия (1) на рис. 6) линии железа исчезают полностью. Фит результирующего спектра не находит вклада железа, давая при этом правильное соотношение параметров N_j из (2), соответствующее химической формуле сахара.

Значительная масса пробы $m = 30$ кг подразумевала существенность эффектов самопоглощения γ -квантов характеристического излучения в веществе пробы. Поглощение в тонком слое описывается с помощью массового коэффициента поглощения μ/ρ . Отношение ослабленного потока I к исходному I_0 задается формулой

$$\frac{I}{I_0} = \exp [-(\mu/\rho)x], \quad (6)$$

где $x = \rho t$ — массовая плотность вещества в г/см²; t — толщина пробы в см; ρ — плотность вещества.

В случае массивного образца необходимо интегрировать по вкладам от тонких слоев, что приводит к следующей упрощенной формуле [8]:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(\mu/\rho)x}{1 - \exp [-(\mu/\rho)x]}. \quad (7)$$

Массовые коэффициенты поглощения для различных элементов в диапазоне 0,5–8 МэВ брались из базы данных [9].

На рис. 5 приведен энергетический спектр γ -квантов, возникающий при облучении магнетита быстрыми нейтронами, а также показаны вклады в суммарный спектр от отдельных элементов. Хорошо виден сильный пик магния при 1369 кэВ, а также значительный пик от углерода в 4439 кэВ и ряд пиков от кислорода.

Для оценки погрешности измерений в смысле повторяемости были проведены многократные повторные измерения. Проба измерялась 12 раз, время одного измерения составляло 20 мин.

В табл. 1 показаны результирующие значения абсолютной (σ_r^{abc}) и относительной ($\sigma_r^{отн}$) среднеквадратичной погрешности измерений:

$$\sigma_r^{abc} = \sqrt{\frac{\sum_i (W_i - C)^2}{n - 1}}, \quad (8)$$

$$\sigma_r^{отн} = 100 \% \cdot \sigma_r^{abc} / C, \quad (9)$$

где n — число измерений; C — среднее значение результатов ММН по всем 12 измерениям; W_i — результат АГП-К в i -измерении.

Результаты расчета в случае магнетита показаны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оценки погрешности измерений (повторяемости) для проб магнезита

Параметр	CO ₂	CaO	MgO	SiO ₂
<i>C</i> , %	14,25	1,87	44,5	0,89
σ_r^{abc} , %	0,19	0,44	0,31	0,13
$\sigma_r^{отн}$, %	1,35	13,59	1,07	13,86

Минерал магнезит имеет химическую формулу MgCO₃ (карбонат магния). При химическом анализе проба истирается и прокаливается, при этом карбонат магния разлагается на MgO и CO₂, полученный CO₂ улетучивается. Поэтому химический анализ, как правило, не дает содержание углерода в пробе, но указывается величина ППП, т.е. потеря при прокаливании. Концентрации остальных определяемых элементов приводятся в массовых долях соответствующих оксидов. Поэтому в табл. 1 приводится массовая доля CO₂ в образце, хотя как такового углекислого газа в образце, конечно, нет. В табл. 1 также приведены оценки погрешностей для массовых долей элементов в пересчете на оксиды, при этом для оксида углерода приводится неградуированное значение, так как химический анализ не содержал сведений о концентрации углерода в образце.

На рис. 7 показано, как результаты АГП-К сходятся со значениями массовых концентраций, полученными с помощью химического анализа. По оси *X* отложены зна-

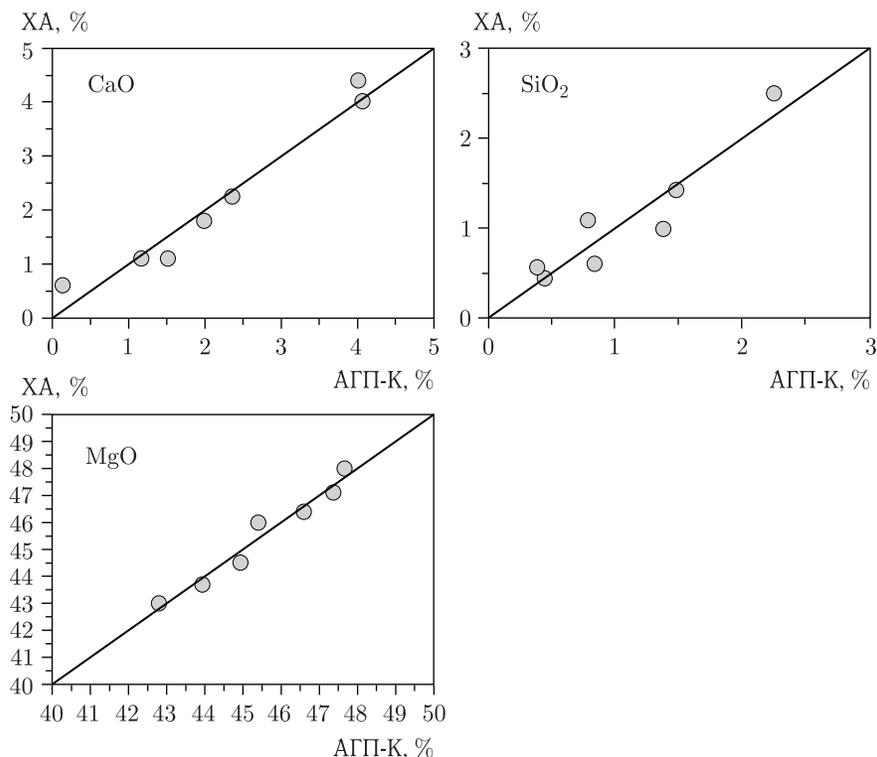


Рис. 7. Сравнение результатов химического анализа и измерений АГП-К

чения массовых концентраций, полученные в измерениях на стенде АГП-К после градуировки. По оси Y — результаты химического анализа (ХА) данных проб. Отдельно проведена линия диагонали равных значений АГП-К и ХА. Градуировочная зависимость для всех проб и диапазонов содержаний выполнялась в виде линейной зависимости

$$X_i^{\text{corr}} = AX_i + B, \tag{10}$$

где X_i^{corr} — результат ММН для i -го образца после градуировки; X_i — результат ММН для i -го образца до градуировки; A и B — градуировочные параметры. Значения градуировочных параметров для отдельных элементов приведены в табл. 2.

Смысл применения градуировок состоит в том, чтобы скорректировать неточности применяемой процедуры и модели расчета массовых концентраций. Например, при измерении исходных (базовых) спектров элементов использовались пробы массой несколько килограммов. Ясно, что это привносит ошибку при разложении спектра массивной пробы. Искажение спектра пробы за счет отражения нейтронов от массы пробы тоже приводит к изменению получаемых значений массовой концентрации элементов. Однако позитивным фактором является то, что все эти неопределенности модели удается хорошо компенсировать простыми линейными зависимостями.

Таблица 2. Градуировочные параметры

Оксид	A	$B, \%$
CaO	1,62	-2,51
MgO	1,70	-4,36
SiO ₂	1,59	0,39

Для оценки степени расхождения между результатами ММН и данными химического анализа рассчитывалось среднеквадратическое отклонение:

$$\text{СКО}_{\text{абс}} = \sqrt{\frac{\sum_i (XA_i - X_i^{\text{corr}})^2}{n}}, \tag{11}$$

$$\text{СКО}_{\text{отн}} = 100\% \cdot \text{СКО}_{\text{абс}}/X_{\text{ср}}, \tag{12}$$

где n — число образцов; XA_i — результат химического анализа для i -го образца; X_i^{corr} — результат ММН для i -го образца после градуировки; $X_{\text{ср}}$ — среднее значение результатов химического анализа.

Также были вычислены коэффициенты корреляции между данными ММН и результатами химического анализа:

$$R = \frac{\sum_i (XA_i^{\text{corr}} - XA_{\text{ср}})(X_i^{\text{corr}} - X_{\text{ср}}^{\text{corr}})}{\sqrt{\sum_i (XA_i^{\text{corr}} - XA_{\text{ср}})^2 \sum_i (X_i^{\text{corr}} - X_{\text{ср}}^{\text{corr}})^2}}, \tag{13}$$

где XA_i^{corr} — результат химического анализа для i -го образца; X_i^{corr} — результат АГП-К для i -го образца после градуировки; $X_{\text{ср}}^{\text{corr}}$ и $XA_{\text{ср}}$ — средние значения результатов АГП-К после градуировки и химического анализа по всем образцам соответственно.

Результаты расчета соответствия с данными ХА в случае магнезита показаны в табл. 3.

Таблица 3. Результаты оценки соответствия с данными ХА для проб магнезита

Оксид	C , %	СКО _{абс} , %	СКО _{отн} , %	R
CaO	2,18	0,29	13,39	0,98
MgO	45,53	0,35	0,78	0,98
SiO ₂	1,08	0,24	21,80	0,93

3.2. Измерения титаномагнетитовой руды. Для измерений титаномагнетитовой руды использовались 11 проб, предоставленных АО «ЕВРАЗ Качканарский ГОК», с известным химическим составом. Масса каждой пробы составляла около 10 кг.

Особенностью предоставленного набора образцов являлась малая вариативность в изменении массовой концентрации отдельных проб. Так, концентрация Fe_{общ} в разных пробах отличалась не более, чем на 1,5%, MgO — на 2%, Al₂O₃ — на 0,5%. Это не давало возможности достоверно определить параметры градуировочной зависимости.

На рис. 8 приведен энергетический спектр γ -квантов, возникающий при облучении образца титаномагнетитовой руды быстрыми нейтронами.

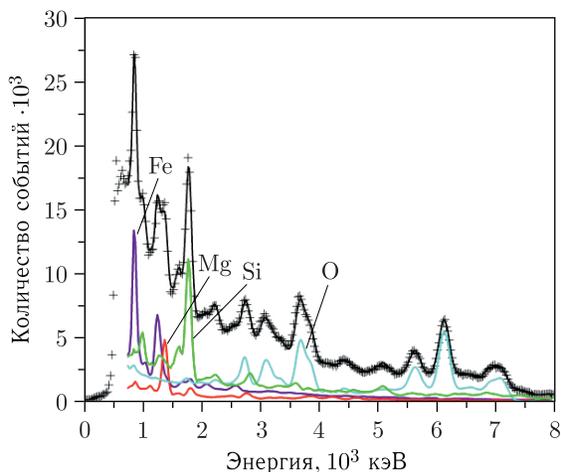


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Энергетический спектр γ -квантов образца титаномагнетитовой руды. Сплошная черная линия — сумма вкладов всех элементов. Вклады отдельных элементов показаны цветом: голубым — кислорода, зеленым — кремния, красным — магния, фиолетовым — железа; крестиками — экспериментальные данные

Таблица 4. Результаты оценки погрешности измерений (повторяемости) проб титаномагнетитовой руды

Параметр	Al ₂ O ₃	CaO	Fe _{общ}	MgO	SiO ₂	TiO ₂
C , %	6,19	16,30	15,48	12,15	39,23	1,36
$\sigma_r^{абс}$, %	0,37	1,03	0,47	0,22	0,62	0,24
$\sigma_r^{отн}$, %	5,77	6,41	3,03	1,88	1,57	20,56

Для оценки погрешности измерений были проведены многократные повторные измерения. Три пробы измерялись 12 раз каждая, время одного измерения составляло 20 мин.

Результаты оценки погрешности в случае титаномагнетита, усредненные по измерениям трех проб, приведены в табл. 4.

3.3. Измерения цинко-свинцовой руды. Измерения цинко-свинцовой руды проводились на 16 пробах полиметаллического месторождения «Озерное». Масса пробы составляла 30 кг. На рис. 9 приведен энергетический спектр γ -квантов, возникающий при облучении образца цинко-свинцовой руды быстрыми нейтронами.

Для оценки погрешности измерений были проведены многократные повторные измерения. Три пробы измерялись 12 раз каждая, время одного измерения составляло 20 мин.

Результаты оценки погрешности, усредненные по измерениям трех проб, представлены в табл. 5.

На рис. 10 показано, как результаты АГП-К сходятся со значениями массовых концентраций, полученных с помощью химического анализа, по оси X отложены значения массовых концентраций, полученных в измерениях на стенде АГП-К. По оси Y —

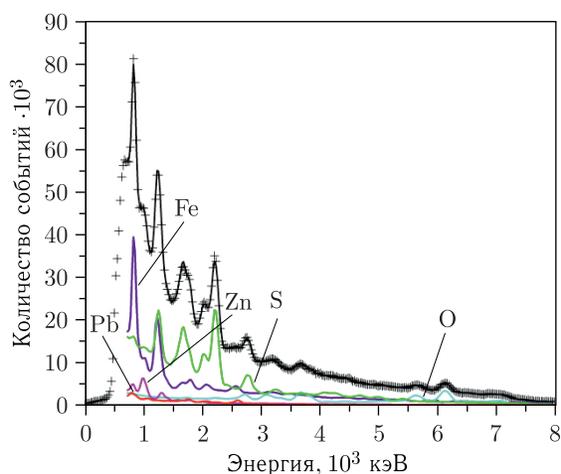


Рис. 9 (цветной в электронной версии). Энергетический спектр γ -квантов образца цинко-свинцовой руды. Сплошная черная линия — сумма вкладов всех элементов. Вклады отдельных элементов показаны цветом: зеленым — серы, фиолетовым — железа, голубым — кислорода, красным — свинца, сиреневым — цинка; крестиками — экспериментальные данные

Таблица 5. Результаты оценки погрешности измерений (повторяемости) для проб цинко-свинцовой руды

Параметр	Al	Fe	Pb	S	Zn
$C_{\text{среднее}}, \%$	1,29	27,88	1,94	31,38	7,15
$\sigma_{\gamma}^{\text{абс}}_{\text{среднее}}, \%$	0,19	0,52	0,61	0,19	0,31
$\sigma_{\gamma}^{\text{отн}}_{\text{среднее}}, \%$	14,96	1,87	31,45	0,60	4,37

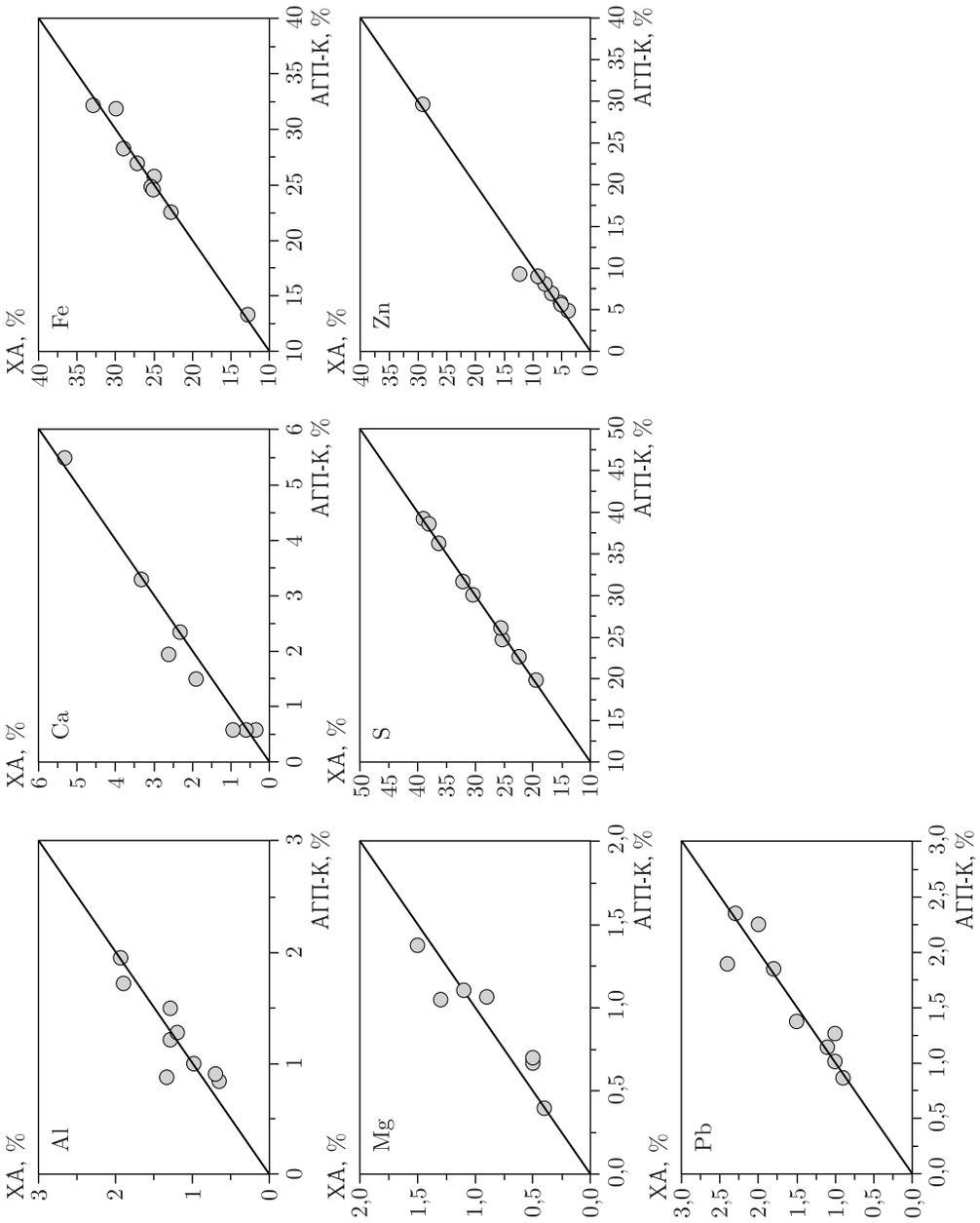


Рис. 10. Сравнение результатов химического анализа и измерений АПП-К

Таблица 6. Градуировочные параметры для отдельных элементов

Параметр	Al	Ca	Fe	K	Mg	S	Zn
A	0,76	0,50	0,86	-0,22	0,84	1,08	0,94
B	-1,69	-0,08	2,31	2,04	0,52	2,78	1,96

Таблица 7. Результаты оценки соответствия с данными ХА для проб цинко-свинцовой руды

Элемент	$C_{\text{среднее}}, \%$	$СКО_{\text{абс}}, \%$	$СКО_{\text{отн}}, \%$	R
Al	1,19	0,20	17,21	0,88
Ca	2,17	0,32	14,84	0,98
Fe	25,58	0,81	3,19	0,99
Mg	0,82	0,19	23,01	0,86
Pb	1,59	0,21	13,45	0,92
S	29,88	0,43	1,44	1,00
Zn	9,91	1,19	12,01	0,99

результаты химического анализа (ХА) данных проб. Отдельно проведена линия диагонали равных значений АГП-К и ХА.

В табл. 6 показаны градуировочные параметры (10) для отдельных элементов.

Оценка сходимости и коэффициента корреляции проводилась по формулам (11)–(13). Результаты расчета в случае цинко-свинцовой руды показаны в табл. 7.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведенные измерения показывают, насколько эффективен метод меченых нейтронов для определения массовых концентраций самых различных элементов.

Важным обстоятельством является то, что анализатор ММН не настраивается только лишь под какой-то один элемент. Напротив, он предоставляет данные по массовым концентрациям всех основных элементов, входящих в состав исследуемого вещества.

С производственной точки зрения очень важно, что проведение анализа не требует какой-либо пробоподготовки. Измерения проб проводятся в их транспортной упаковке.

Градуировочные характеристики сводятся к простым линейным зависимостям, которые хорошо аппроксимируют результаты в широком диапазоне содержаний элементов.

Что касается точностей измерения, то полезно свести полученные данные для относительных $\sigma_r^{\text{отн}}$ (9), приведенные в табл. 1, 3, 4, в результирующую табл. 8.

Как видно из результатов, показанных в табл. 8, наилучшая относительная точность измерений получилась для серы $\sigma_r^{\text{отн}} = 0,6\%$. Этому способствует структура энергетического спектра γ -квантов при облучении серы. В спектре серы имеются четыре пика со значительными сечениями (см. рис. 9), что позволяет надежно зафиксировать вклад серы в общий энергетический спектр руды.

Таблица 8. Оценка погрешности измерений $\sigma_r^{\text{отн}}$ (в смысле повторяемости) для разных оксидов и элементов. C — среднее диапазона содержаний

Параметр	S	MgO	SiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃	Zn	CaO	Pb	TiO ₂
C , %	31,38	12,15	39,23	27,88	6,19	7,15	16,30	1,94	1,36
$\sigma_r^{\text{отн}}$, %	0,60	1,88	1,57	1,87	5,77	4,37	6,41	31,45	20,56

Хорошие перспективы показали измерения массовой концентрации MgO, SiO₂, Fe_{общ}, где $\sigma_r^{\text{отн}}$ оказалось на уровне 1–2%. Для Al₂O₃, Zn и CaO $\sigma_r^{\text{отн}}$ составило 5–6%. Тяжелые элементы Pb и TiO₂ измеряются с худшей точностью, главным образом, из-за меньших содержаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан стенд для моделирования работы конвейерного анализатора элементного состава минерального сырья, работающий на основе метода меченых нейтронов. Проведено сравнение результатов измерений массовой концентрации отдельных элементов и оксидов, выполненных на стенде, с результатами химического анализа. Оценены точности определения массовых концентраций различных элементов и оксидов в составе проб магнезитовой, титаномагнетитовой и полиметаллической (свинец, цинк) руды.

Благодарности. Авторы выражают благодарность инновационному фонду «Сколково» и С. А. Журбе за финансовую поддержку при создании стенда; сотрудникам ОИЯИ и специалистам ООО «Диамант» Д. А. Волкову, Е. В. Зубареву, П. П. Реунову, О. Г. Тарасову, принимавшим участие в создании и испытании стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Valkovic V.* 14 MeV Neutrons: Physics and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2015. P. 516.
2. *Alexakhin V. Y. et al.* Detection of Diamonds in Kimberlite by the Tagged Neutron Method // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. V. 785. P. 9.
3. *Копач Ю. Н., Сапожников М. Г.* Применение метода меченых нейтронов для фундаментальных и прикладных исследований // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 1. С. 103–177.
4. *Bystritsky V. M. et al.* DVin — Stationary Setup for Identification of Explosives // Phys. Part. Nucl. Lett. 2008. V. 5. P. 441.
5. *Bolshakov I., Kolesnik M., Sorokin M., Kremenets V., Razinkov E., Rogov Y., Sapozhnikov M.* Application of Tagged Neutron Method for Element Analysis of Phosphorus Ore // Intern. J. Miner. Process. Extract. Metall. 2020. V. 5. P. 54–59.
6. *Алексахин В. Ю. и др.* Оценка возможности определения элементного состава горных пород с помощью метода меченых нейтронов. Препринт ОИЯИ P14-2015-52. Дубна, 2015. 15 с.
7. *Alexakhin V. Y. et al.* Determination of the Elemental Composition of Geological Rocks and Minerals by the Method of Tagged Neutrons // 23rd Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Fund. Interactions & Neutrons, Nucl. Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics (ISINN-23), Dubna, Russia, May 25–29, 2015.

8. *Jodlowski P.* Self-Absorption Correction in Gamma-Ray Spectrometry of Environmental Samples — An Overview of Methods and Correction Values Obtained for the Selected Geometries // *Nukleonika*. 2006. V. 51, Suppl. 2. P. S21–S25.
9. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

Получено 3 марта 2025 г.