

Специальность 6В07201 – «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»
Дисциплина «Радиоактивные методы исследования»

Лекция

Физические основы гамма-гамма метода селективного

Лектор: Пак Ю.Н.
д.т.н., проф. каф. ГРМПИ



План лекции:

1. Общие сведения.
2. Теория метода в приближении однократного взаимодействия первичного гамма-излучения с веществом.
3. Методика и техника измерений.
4. Особенности практического применения ГГМ-с при исследовании скважин.
5. Особенности практического применения ГГМ-с при контроле качества полезных ископаемых.
6. Примеры использования ГГМ-С

Общие сведения

Селективный гамма-гамма-метод был предложен в 1957г. Воскобойниковым Г.М. Значительный вклад в развитие теоретических аспектов и методики исследований внесли Уткин В.И., Арцыбашев В.А., Филиппов Е.М., Очкур А.П., Мейер В.А., Пшеничный Г.А., Красноперов В.А. и другие.

Селективный гамма-гамма-метод относится к классу гамма-методов. Он основан на облучении горной породы потоком мягкого гамма-излучения с энергией менее 200-300 кэВ и регистрации рассеянного породой γ -излучения. По внешним признакам он схож с ранее рассмотренным плотностным методом.

Принципиальная особенность состоит в использовании низкоэнергетического γ -излучения, для которого возрастает вероятность фотоэлектрического поглощения, в особенности рассеянных квантов.

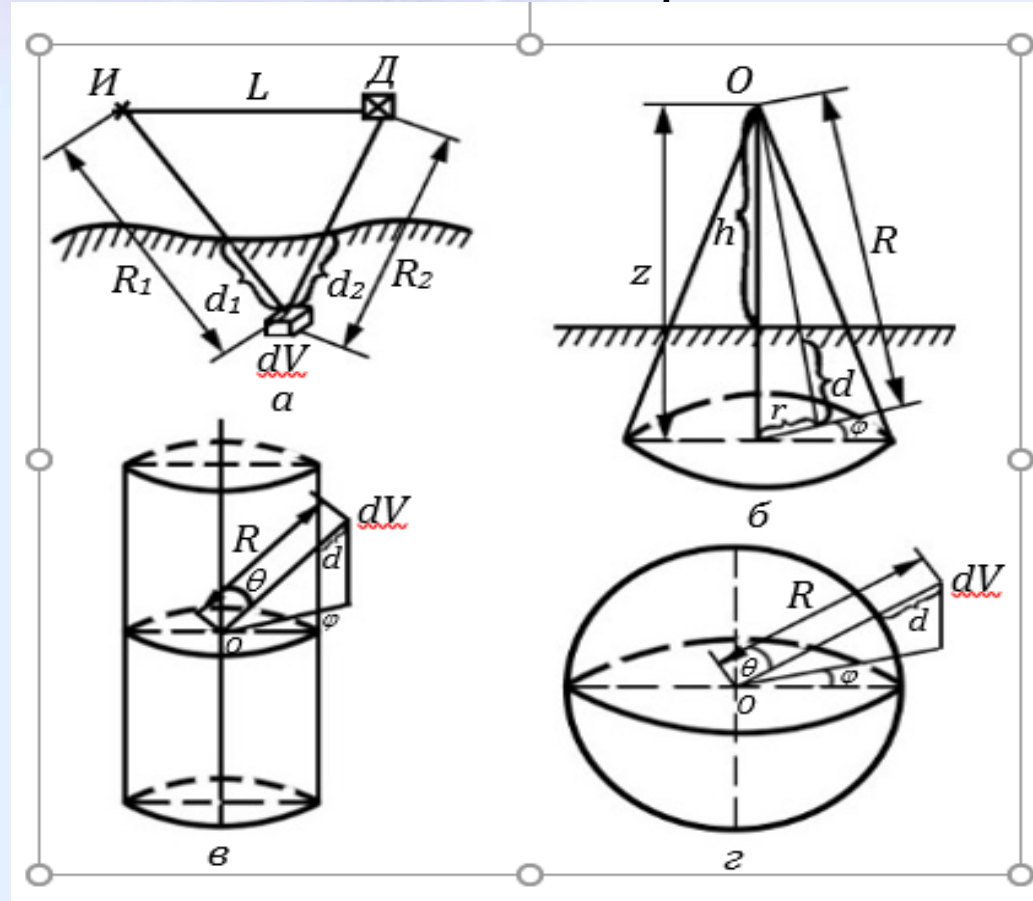
Преимущественное протекание фотоэффекта, сечение которого сильно зависит от Z породы, означает, что поле вторичного γ -излучения будет преимущественно зависеть от вещественного состава среды. При добавлении в горную породу с небольшим Z даже малых примесей тяжелых элементов существенно меняется интенсивность рассеянного гамма-излучения.

ГГМ-С применяют в лабораторных условиях для экспрессного анализа проб, в полевых условиях для опробования на поверхности и в подземных горных выработках, а также для исследования скважин. В зависимости от объекта исследования конструкции зондов могут меняться.

Методические характеристики различных модификаций гамма-методов можно теоретически обосновать на основе аналитического выражения, связывающего плотность потока рассеянного излучения с γ -ослабляющими свойствами контролируемой среды и геометрическими условиями измерения.



К расчету плотности потока вторичного гамма-излучения



Границы раздела: а – произвольная; б – плоская;
в – цилиндрическая; г – сферическая

Достаточно корректное решение задачи переноса излучения можно получить методом статистического моделирования, основанным на аппроксимации истинных физических процессов взаимодействия некоторыми численными моделями. Однако значительное количество расчетного времени ограничивает применение данного метода при определении вторичных γ -полей. Широко используется метод расчета, в основу которого положено приближение однократного взаимодействия квантов.

Дифференциальное уравнение для плотности потока вторичного γ -излучения согласно такой модели непосредственно следует из геометрических соотношений (рисунок а) и экспоненциального закона ослабления излучения в исследуемой среде:

$$dN = \frac{N_0 K \eta \rho}{4\pi R_1^2 R_2^2} \exp[-(\mu_0 \eta \rho d_1 + \mu_1 \eta \rho d_2)] dV, \quad (1)$$

где N_Q – плотность потока первичного гамма-излучения;

K – коэффициент преобразования первичного излучения во вторичное;

R_1, R_2 – расстояния до элементарного объема dV от источника и детектора, соответственно;

d_1, d_2 – отрезки, проходимые в среде первичным и вторичным квантами;

μ_0, μ_1 – массовые коэффициенты ослабления первичного и вторичного излучения средой;

η – коэффициент заполнения;

ρ – плотность среды.

Найти суммарную плотность потока вторичного излучения можно численным интегрированием, которое затруднено ввиду многочисленности параметров, определяющих поле вторичного γ -излучения. Плотность потока вторичного излучения можно выразить аналитически при некоторых допущениях, учитывающих особенности геометрических условий измерений.

При расстоянии h , значительно превышающем длину зонда L , источник и детектор можно считать совмещенными. Таким образом, $R_1 = R_2 = R$; $d_1 = d_2 = d$.

Тогда выражение (1) можно записать в виде

$$dN = \frac{N_o K \eta \rho}{4\pi R^4} \exp[-\eta \rho d (\mu_o + \mu_1)] dV. \quad (2)$$

Более простое аналитическое соотношение, связывающее плотность потока однократно рассеянных γ -квантов с характеристиками среды, можно приближенно найти для нулевого зонда.

Плотность потока однократно рассеянных квантов от элементарного слоя dx , расположенного в исследуемой среде на глубине x , и достигающих детектора, может быть найдена из выражения:

$$dN_s = KN_o \sigma' \exp[-(\mu_o' + \mu_1')x] dx, \quad (3)$$

где K – постоянный множитель, зависящий от геометрических условий измерений;

N_0 – плотность потока первичных квантов при $x = 0$;

σ' – линейный коэффициент рассеяния первичных квантов средой;

μ_0' , μ_1' – полные линейные коэффициенты ослабления соответственно первичного и рассеянного излучений средой.

Проинтегрировав (3) в пределах от 0 до ∞ и перейдя от линейных коэффициентов к массовым, получим:

$$N_s = \frac{KN_0\sigma}{\mu_0 + \mu_1}.$$

Методика и техника измерений

Эффективный атомный номер горной породы Z следует рассматривать как вспомогательный параметр, позволяющий однозначно сравнивать породы по их гамма-ослабляющим свойствам. Для ряда пород и минералов наблюдается существенная их дифференциация по гамма-ослабляющим свойствам. Различие в эффективных атомных номерах пород позволяет применять селективный гамма-гамма-метод для литологического расчленения пород.

Особенно важное место занимает ГГМ-С для количественного определения содержания какого-либо элемента. Условием для успешного решения этой задачи является наличие однозначной, близкой к функциональной, зависимости между содержанием определяемого элемента в породе и ее эффективным атомным номером.

Это условие вытекает из того, что по интенсивности рассеянного гамма-излучения определяется значение Z породы, а по его величине, имея взаимосвязь Z от содержания определяемого элемента, оценивается его содержание.

Очевидно, что между Z породы и содержанием в ней какого-либо элемента будет наблюдаться функциональная связь только для бинарной среды. Для подтверждения этого положения возьмем за основу формулу для расчета Z которая справедлива для интервала энергии, при которой преимущественно протекает комптоновское рассеяние:

$$\bar{Z} = \sum_{i=1}^n c_i Z_i.$$

Таблица – Эффективные атомные номера пород и минералов

Порода (минерал)	Эффективный атомный номер	
	среднее значение	пределы значения
Нефть (86% С; 14% Н)	5,6	-
Бурый уголь	6,67	6,55 – 6,80
Вода	7,43	-
Песчаник	12,39	11,63 – 13,15
Глина	13,07	11,42 – 14,72
Гранит	13,64	13,28 – 14,00
Доломит	13,80	13,67 – 13,92
Гипс	14,55	-
Мергель	14,74	14,38 – 15,10
Известняк	15,13	14,84 – 15,53
Ангидрит	15,60	-
Пирит	22,0	-
Магнетит	23,55	-
Галенит	77,62	-

Для двухкомпонентной среды выражение для определения Z примет вид:

$$\bar{Z} = c_A Z_A + c_H Z_H,$$

где c_A, c_H – соответственно, содержание определяемого элемента (A) и наполнителя (H);

Z_A, Z_H – атомные номера соответственно определяемого элемента и наполнителя.

Приняв во внимание равенство $c_A + c_H = 1$, преобразуем до вида:

$$\bar{Z} = Z_H + c_A (Z_A - Z_H). \quad (4)$$

Из выражения следует, что между Z бинарной породы и концентрацией определяемого элемента имеется функциональная связь, т.е. каждому значению c_A соответствует строго единственное значение Z . Это позволяет по измеренному значению Z породы точно оценивать содержание элемента.

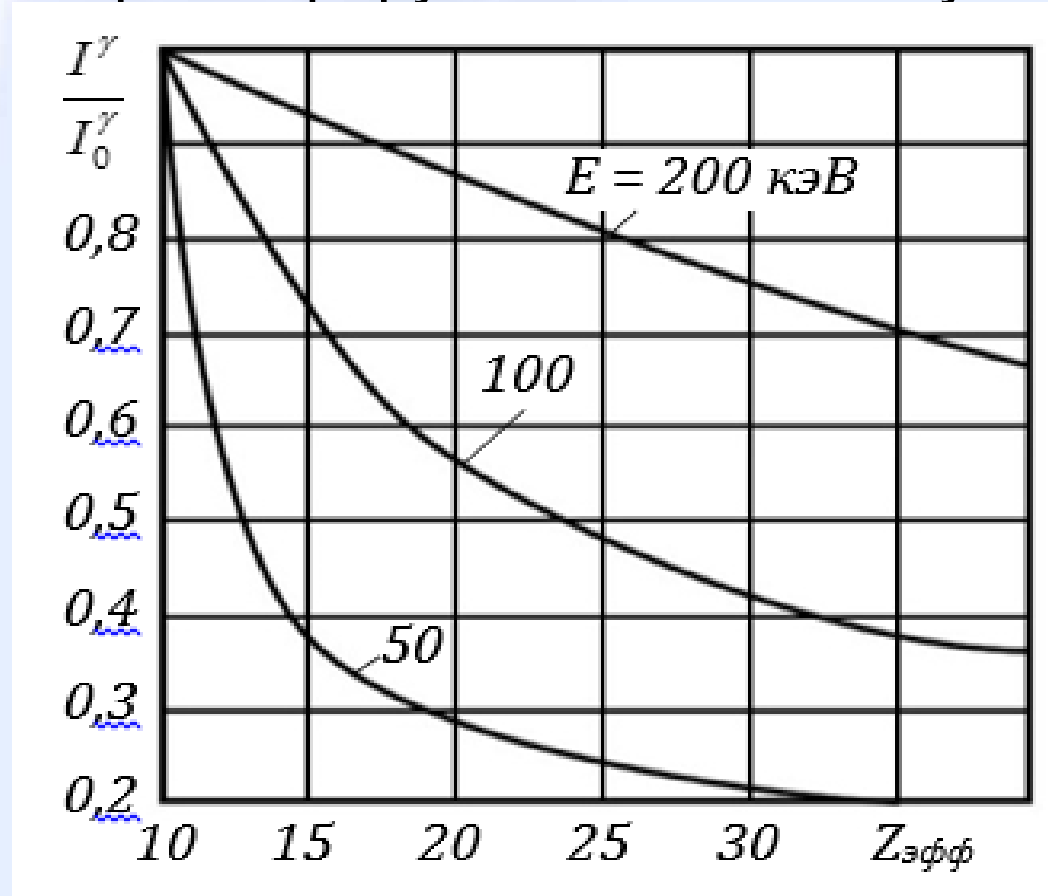
Более 95 % породообразующих соединений представлены алюмосиликатами и оксидами железа. Поэтому изменение эффективного атомного номера руды практически однозначно связано с флуктуациями концентрации железа.

Другим объектом, благоприятным для постановки селективного гамма-гамма-метода применительно к количественному анализу, являются ископаемые угли, которые в первом приближении можно представить бинарной смесью органической массы (углерод) и минеральной части.

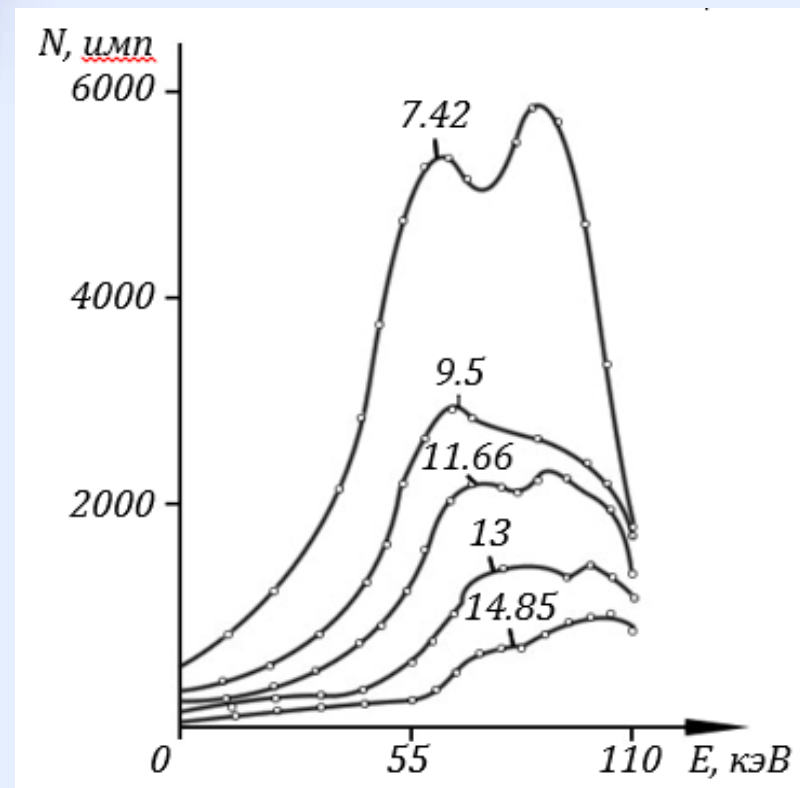
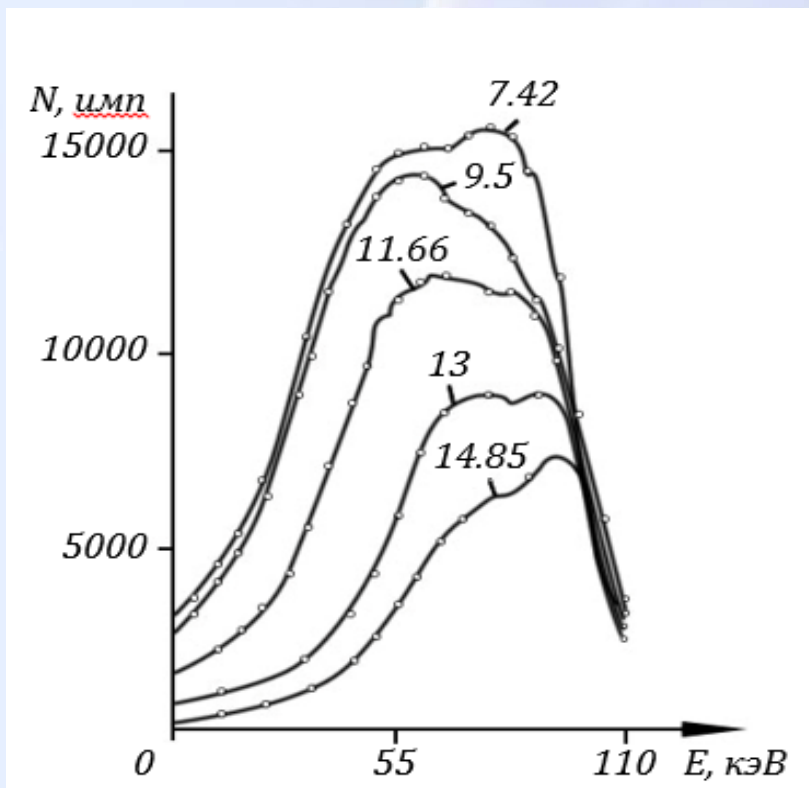
Если элементный состав минеральной части угля стабилен, то между Z углей и суммой минеральных примесей (зольностью) существует довольно тесная связь, которая может быть положена в основу определения зольности угля.



Основная зависимость ГГМ-С при различной энергии регистрируемого гамма-излучения



На рисунке даны аппаратурные спектры рассеянного гамма-излучения источника Co-57 .



Аппаратурные спектры рассеянного гамма-излучения источника Co-57 (левый – зонд 3 см; правый – зонд 5 см; шифр кривых – Z среды)

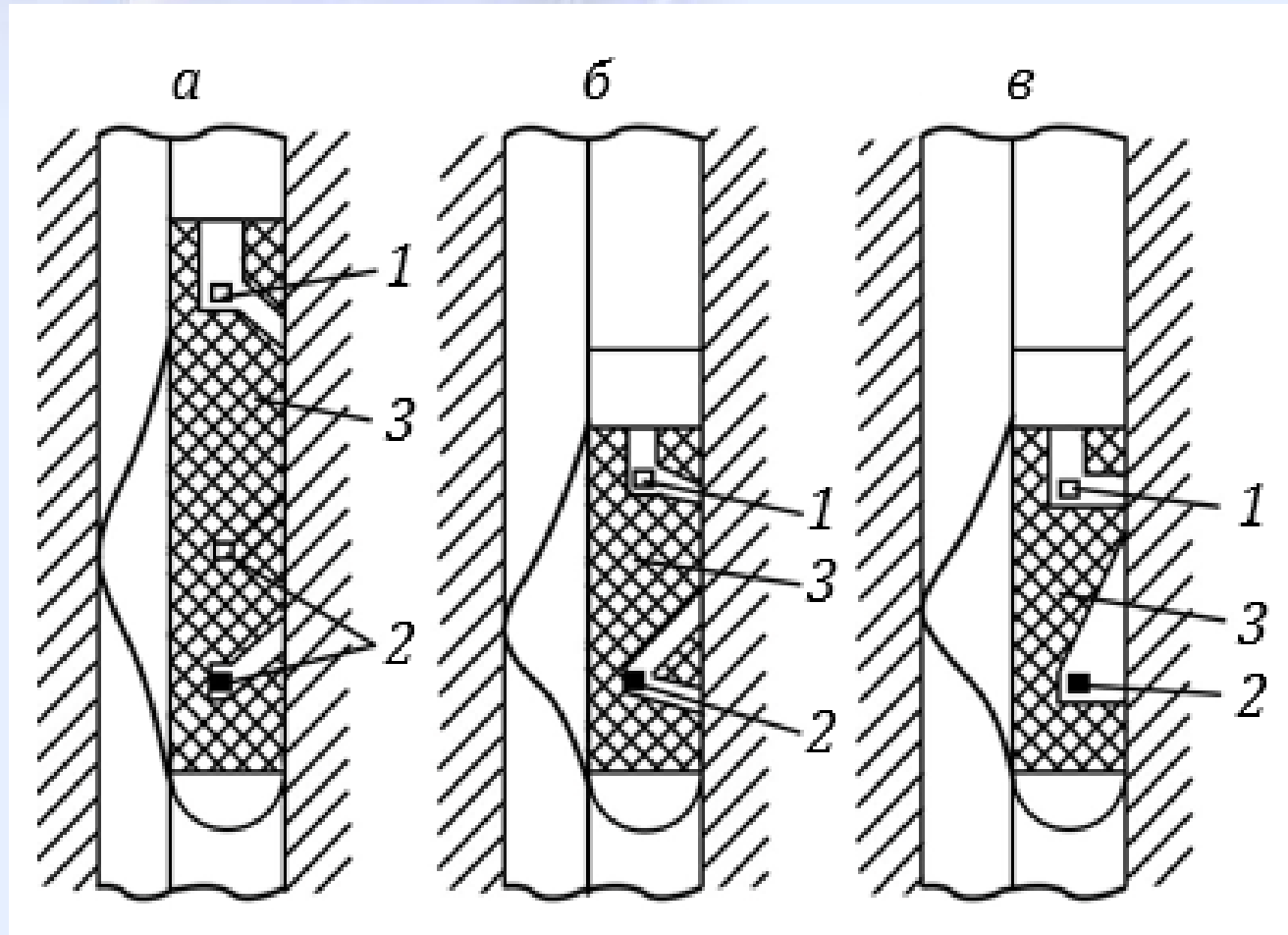
Особенности практического применения ГГМ-с при исследовании скважин

Селективный ГГК применяют для выделения рудных пластов, определения их мощности, строения и содержания полезного ископаемого. В моноэлементных рудах Z определяется содержанием тяжелого элемента. При одновременном присутствии в рудах нескольких тяжелых элементов метод используется для установления глубины залегания, мощности и строения рудных пластов.

Измерения ГГК-с проводят в геометрии либо прямой видимости, либо диффузного отражения. Используют зонды одинарные (преимущественно инверсионные по отношению к изменению плотности пород) и комбинированные (двойные, двухлучевые и каплевидные), реализующие условия измерений одновременно для доинверсионных и заинверсионных зондов.



Зонды ГГК-с



а – двойной; б – двухлучевой; в – каплевидный;
1 – детектор; 2 – источник; 3 – экран

В двухлучевом ГГК-с обеспечивается облучение исследуемой среды двумя коллимированными пучками гамма-квантов от одного источника, а расстояние от выходных отверстий коллиматоров до детектора выбирают таким, чтобы создавались условия измерений соответственно в доинверсионной и заинверсионной областях зависимости показаний метода от плотности. Спектрометрический вариант селективного гамма-гамма каротажа предусматривает регистрацию рассеянных квантов в мягкой (менее 150 кэВ) и жесткой (более 200 кэВ) областях вторичного спектра. Отношение измеренных интенсивностей слабо зависит от изменения плотности пород, поскольку при вариации плотности интенсивность рассеянного гамма-излучения в широком диапазоне энергий изменяется примерно одинаково.

Влияние промежуточного слоя между зондом и поверхностью исследуемой среды устраняется в ограниченных пределах применением комбинированных зондов с прижимными устройствами.

Особенности практического применения ГГМ-с при контроле качества полезных ископаемых

При количественном анализе минерального сырья выбор оптимальных параметров, в частности, энергии первичного излучения следует осуществлять с точки зрения получения минимальной методической погрешности в условиях реального действия различных влияющих факторов, исходя из максимальной чувствительности к определяемому параметру и минимальной чувствительности к мешающим факторам:

$$\sigma_M = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S}\right)^2 D_i} = \min,$$

где S , S_i – чувствительность метода к определяемому параметру и мешающему фактору, соответственно;

D_i – дисперсия мешающего фактора.

В селективном гамма-гамма методе одним из мешающих факторов при определении Z пород и руд является переменная плотность. Это вытекает из того, что для рассматриваемого интервала энергии первичного гамма-излучения общий коэффициент ослабления зависит не только от Z породы, но и ее плотности. Если учесть, что между Z и плотностью нет однозначной взаимосвязи, то некоррелируемые с эффективным атомным номером изменения плотности внесут помехи при оценке вещественного состава.

Наиболее простым и эффективным способом устранения влияния переменной плотности является использование инверсионных зондов, использующих инверсионный характер зависимости потока рассеянных квантов от плотности.

Экспериментально доказано, что положение инверсии соответствует некоторой области значений плотности. Эта область снижается в зависимости от энергии применяемого излучения и длины зонда.

Если выбрать длину зонда такой, чтобы область инверсии совпадала с рабочим диапазоном изменения плотности, то такой зонд будет практически нечувствительным к флуктуациям плотности пород.

Устранить влияние плотности при количественном анализе руд селективным гамма-гамма методом можно способом спектральных отношений. Суть способа состоит в измерении интенсивности рассеянных гамма-квантов в двух энергетических интервалах спектра. Эти интервалы выбирают такими, чтобы изменения плотности сопровождались одинаковыми изменениями показаний.

При этом величина отношения интенсивностей в выбранных интервалах спектра будет константой при вариации плотности. Такая методика реализуется с помощью спектрометрической аппаратуры, позволяющей отдельно фиксировать кванты определенных энергий.

Способ спектральных отношений в ГГМ-С успешно реализован применительно к анализу углей на зольность. Предложено измерять кванты в районе 40-70 кэВ и выше 120 кэВ. Отношение интенсивностей квантов в этих интервалах спектра практически не зависит от колебаний плотности и кавернозности.

Другим возмущающим фактором при реализации ГГМ-С является изменение промежуточного слоя, например, воздушного зазора между поверхностью среды и зондом. Задача учета и устранения влияния промежуточного слоя особенно актуальна при опробовании стенок горных выработок, непрерывном анализе сырья в транспортном потоке и др.

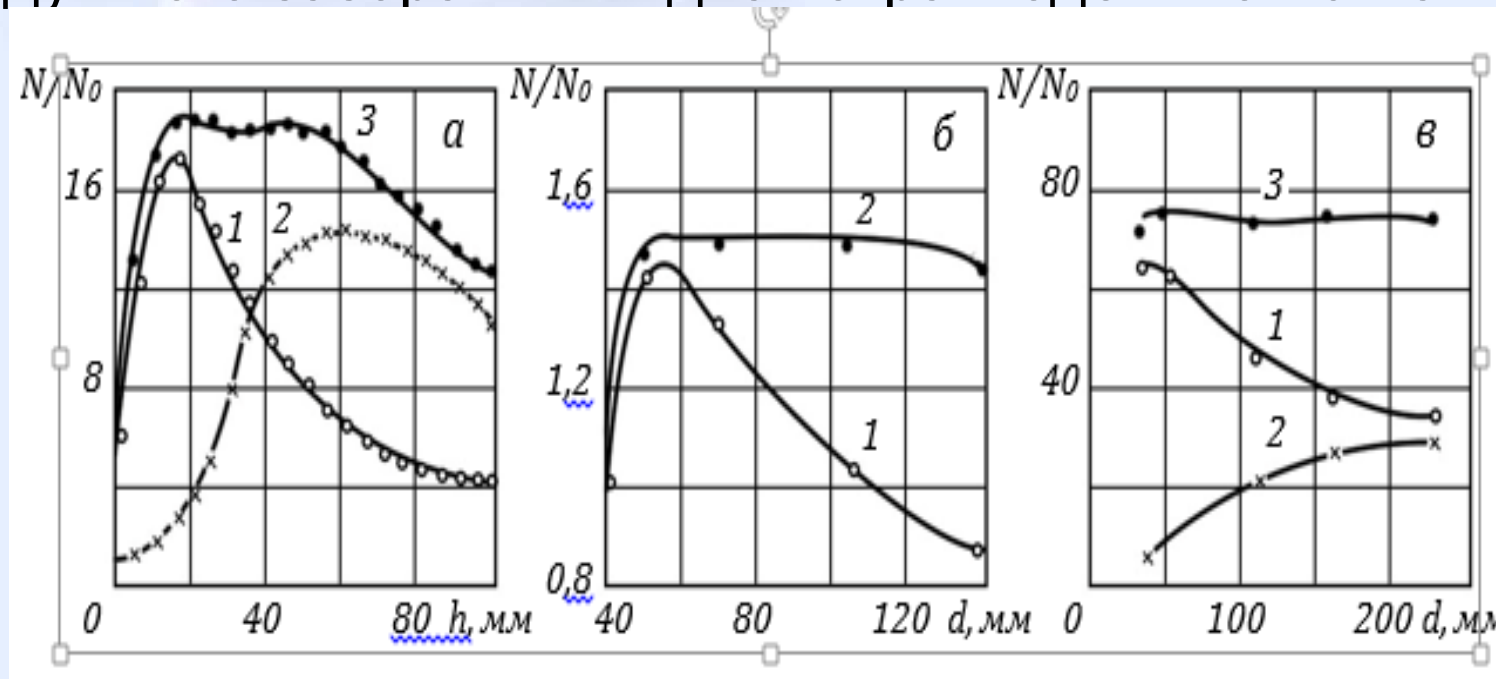
Суть геометрической инверсии заключается в том, что с увеличением воздушного зазора h между зондом и поверхностью среды поток рассеянных квантов сначала возрастает и, достигнув максимального значения, снижается с дальнейшим увеличением h .

В области экстремума (инверсии) интенсивность практически слабо зависит от колебаний h . Поэтому, выбрав инверсионную высоту за исходное расстояние между зондом и объектом исследования, можно осуществлять опробование в условиях небольших колебаний зазора, ограниченных областью инверсии.

Очевидно, что область использования простых инверсионных к h зондов ограничена сравнительно узким интервалом колебаний зазора.

Широкое применение в практике селективного гамма-гамма метода нашли сложные зонды, в которых за счет использования различных ветвей инверсионных зависимостей удается получить сравнительно широкую область независимости показаний зонда от колебаний h . Двухисточниковый зонд состоит из двух источников первичного гамма-излучения, расположенных по одну сторону от детектора на различных расстояниях от него.

Зависимость потока рассеянного γ -излучения от величины воздушного зазора h или диаметра модельной скважины d



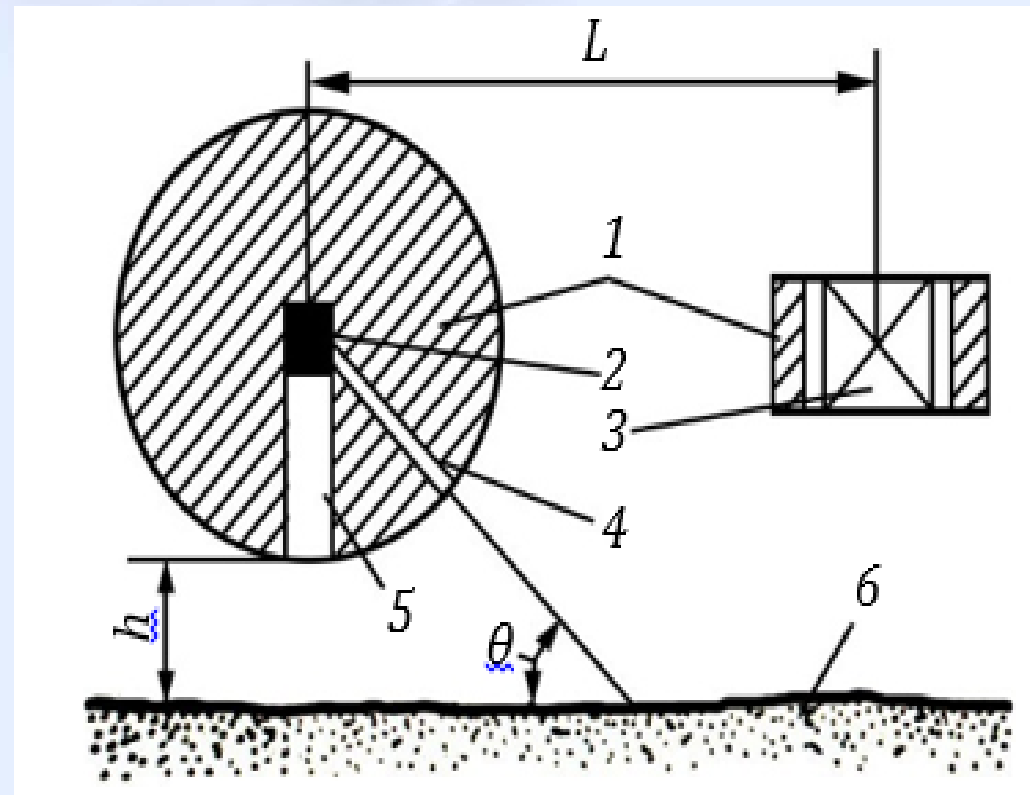
а – 1 – $R_1=15$ мм, $Q_2=2$ мкюри; 2 – $R_2=65$ мм, $Q_2=5$ мкюри; 3 – двойной зонд.

б – 1 – $R=25$ мм, 2 – двойной зонд ($R_1=25$ мм, $R_2=105$ мм).

в – 1 – малый зонд $R_1=1,8$ мм, $Q_1=0,25$ мкюри; 2 – $R_2=19$ мм, $Q_2=2,5$ мкюри; 3 – двойной зонд

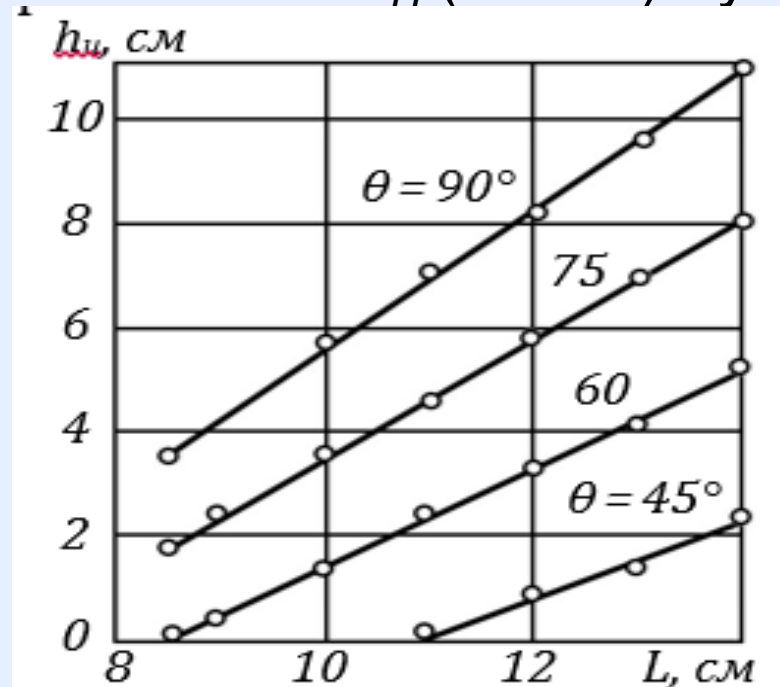


Геометрия измерений



- 1 – защитный контейнер; 2 – источник;
3 – детектор; 4 – наклонный коллиматор;
5 – прямой коллиматор; 6 – среда

На рисунке изображены зависимости положения точки инверсии h_H (расстояние зонд-среда, при котором наблюдается максимум скорости счета) от длины зонда при различных углах. Знание точек инверсии позволяет оценить возможность получения двухлучевым зондом зоны независимости скорости счета от h в диапазоне, лежащем между положениями точек инверсии для прямого h_{Γ} ($\theta=90^\circ$) и наклонного h_H ($\theta<90^\circ$) лучей.



Зависимости положения точек инверсии от длины зонда

Эта возможность обеспечивается тем, что при увеличении h в пределах от h_H до h_D интенсивность рассеянных квантов от наклонного луча снижается, а от прямого возрастает.

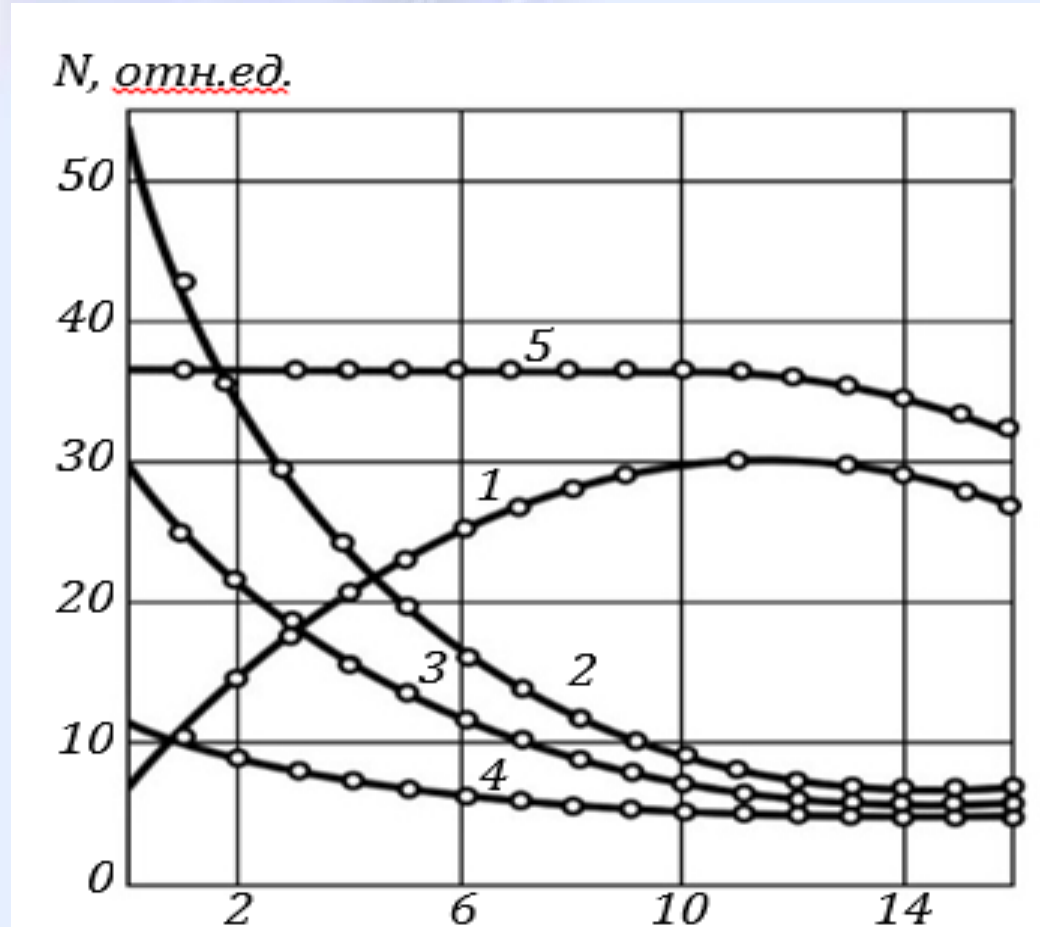
Следовательно, суммарная интенсивность двухлучевого зонда, состоящего одновременно из двух таких коллиматоров, будет слабее зависеть от вариаций h в указанных пределах.

Однако добиться полной инвариантности суммарной скорости от h можно лишь при условии, что при изменении h абсолютные приращения скорости счета для прямого и наклонного лучей будут равны по величине и обратны по знаку.

Это достигается выбором угла наклона коллиматора, обращенного в сторону детектора, и соотношения диаметров коллиматоров.



Зависимости скорости счета от величины воздушного зазора



1 – $\Theta = 90^\circ$, $d_H = 10$ мм; 2 – $\Theta = 30^\circ$, $d_H = 3$ мм; 3 – $\Theta = 30^\circ$, $d_H = 2,45$ мм;
4 – $\Theta = 30^\circ$, $d_H = 2$ мм; 5 – суперпозиция 1÷3

Глубинность метода является одним из важнейших параметров, характеризующих представительность исследований. Чем больше глубинность ГГМ-С, тем с большей глубины поступает информация о вещественном составе Z среды.

Глубинность зависит от энергии применяемого гамма-излучения, эффективного атомного номера породы, ее плотности, а также геометрических характеристик зонда. Чем выше энергия гамма-излучения и ниже и плотность породы, тем выше глубинность.

Иногда за глубинность принимают величину, равную длине свободного пробега первичных квантов в среде.

Примеры использования ГГМ-С

Селективный гамма-гамма метод дает информацию о валовом вещественном составе горных пород и руд. Чувствительность ГГМ-С по сравнению с ГГМ-П при выделении пород различного вещественного состава выше. Различие в чувствительности тем существеннее, чем больше атомный номер определяемого элемента. Так при опробовании бедных свинцовых руд ($m_{Pb} < 1\%$) плотность, и показания ГГМ-П меняются незначительно.

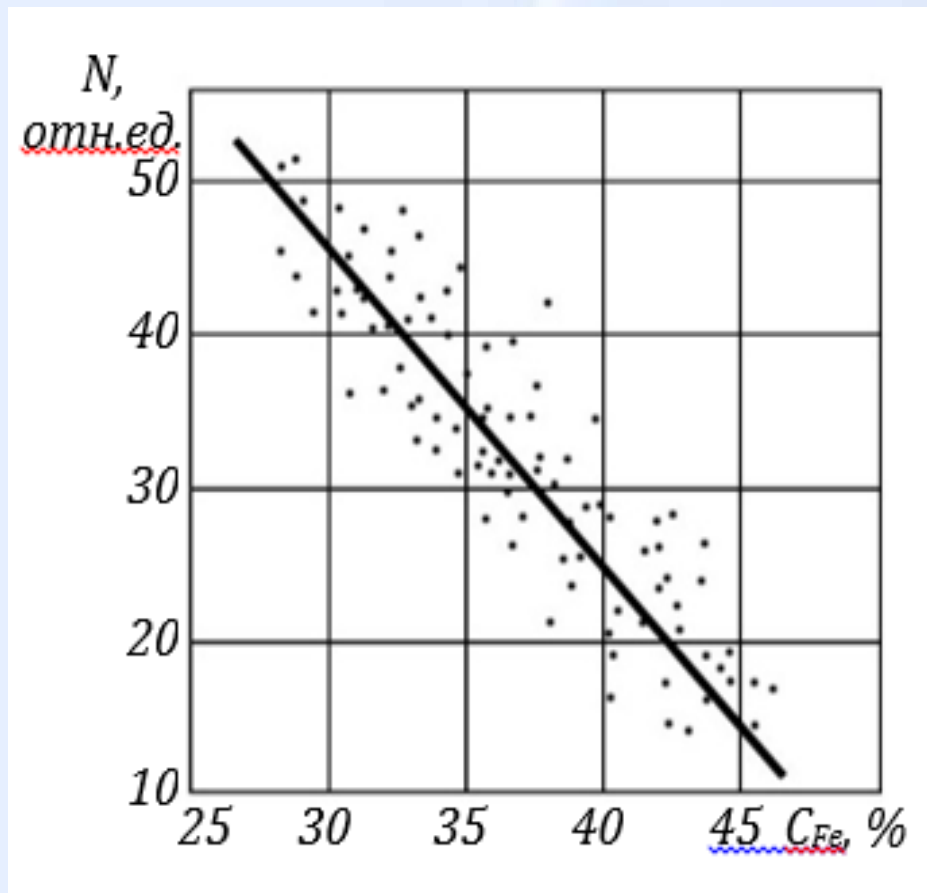
Количественное опробование руд селективным методом возможно практически на монометальных месторождениях и в тех случаях, когда между содержанием рудного компонента и эффективным атомным номером имеется устойчивая корреляционная зависимость. В этой связи при исследовании многих объектов, таких как полиметаллические, барито-свинцовые, вольфрамо-молибденовые, сурьмяно-ртутные и других руд сложного вещественного состава селективный гамма-гамма метод используется только для оконтуривания зон оруденения.

Наиболее благоприятными объектами для постановки ГГК-С являются месторождения железных руд, углей, горючих сланцев. На этих месторождениях ГГК-С применяется в качестве ведущего метода при геологической документации разрезов скважин и количественной оценки качества сырья.

Железные руды. В большинстве железорудных объектов наблюдается тесная корреляция содержания железа в руде не только с эффективным атомным номером, но и плотностью. Поэтому селективный метод успешно применяется и для определения границ промышленного оруденения и оценки качества руд. Наличие таких корреляционных связей приводит к тому, что диаграммы ГГК-С и ГГК-П по характеру полностью идентичны.

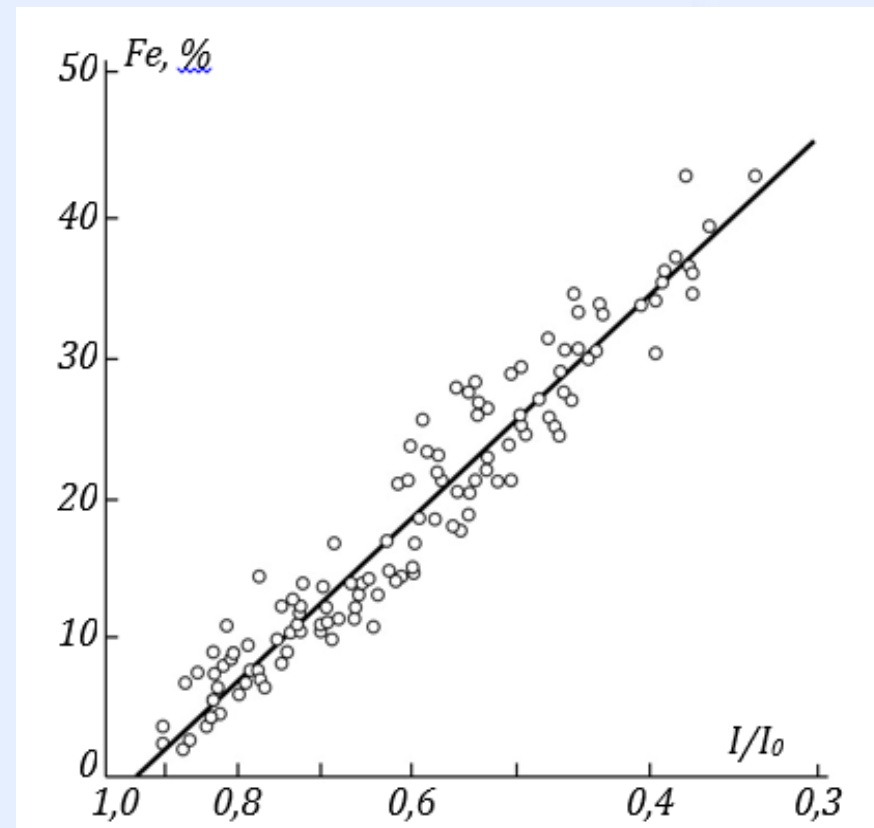
Комплексное использование селективного гамма-гамма метода ярко иллюстрируется результатами, полученными на Лисаковском железорудном месторождении. На этом месторождении успешно внедрен данный метод для экспрессного определения содержания железа в различных объектах.

Зависимость показаний ГГМ-с от содержания железа



а

Зависимость показаний ГГМ-с от содержания железа на Ковдорском магнетитовом месторождении



б

Количественная оценка качества железных руд затруднена при опробовании богатых выщелоченных и руд мартитового и гидрогематитового состава. Вследствие их большой пористости они сопоставимы по гамма-ослабляющим свойствам с бедными роговиками. В таких случаях необходимо пользоваться инверсионным к плотности зондом, который, обладая несколько худшей к Z чувствительностью, практически устраняет влияние переменной плотности. Опробование железных руд с изменяющейся плотностью можно также проводить спектрометрическим вариантом ГГМ-С.

Ископаемые угли. При разведке месторождений твердых горючих ископаемых основные задачи заключаются в детальном расчленении угленосных пород, определении их мощности и оценке качества. Так как угли в сравнении с вмещающими породами характеризуются низкими значениями эффективного атомного номера и плотности, то для каротажа угольных скважин может использоваться как селективный, так и плотностной гамма-гамма методы.

Опыт использования этих двух модификаций метода позволяет отдать предпочтение селективному методу по ряду причин.

Во-первых селективный метод более чувствительнее к Z породы, нежели плотностной метод к плотности, благодаря степенной взаимосвязи сечения фотопоглощения низкоэнергетического гамма-излучения.

Во-вторых, применение зондов малой длины в ГГМ-С позволяет детально исследовать и выделять тонкие пласты. Кроме того благодаря более тесной корреляции зольности углей с Z достигается меньшая погрешность в определении зольности углей.

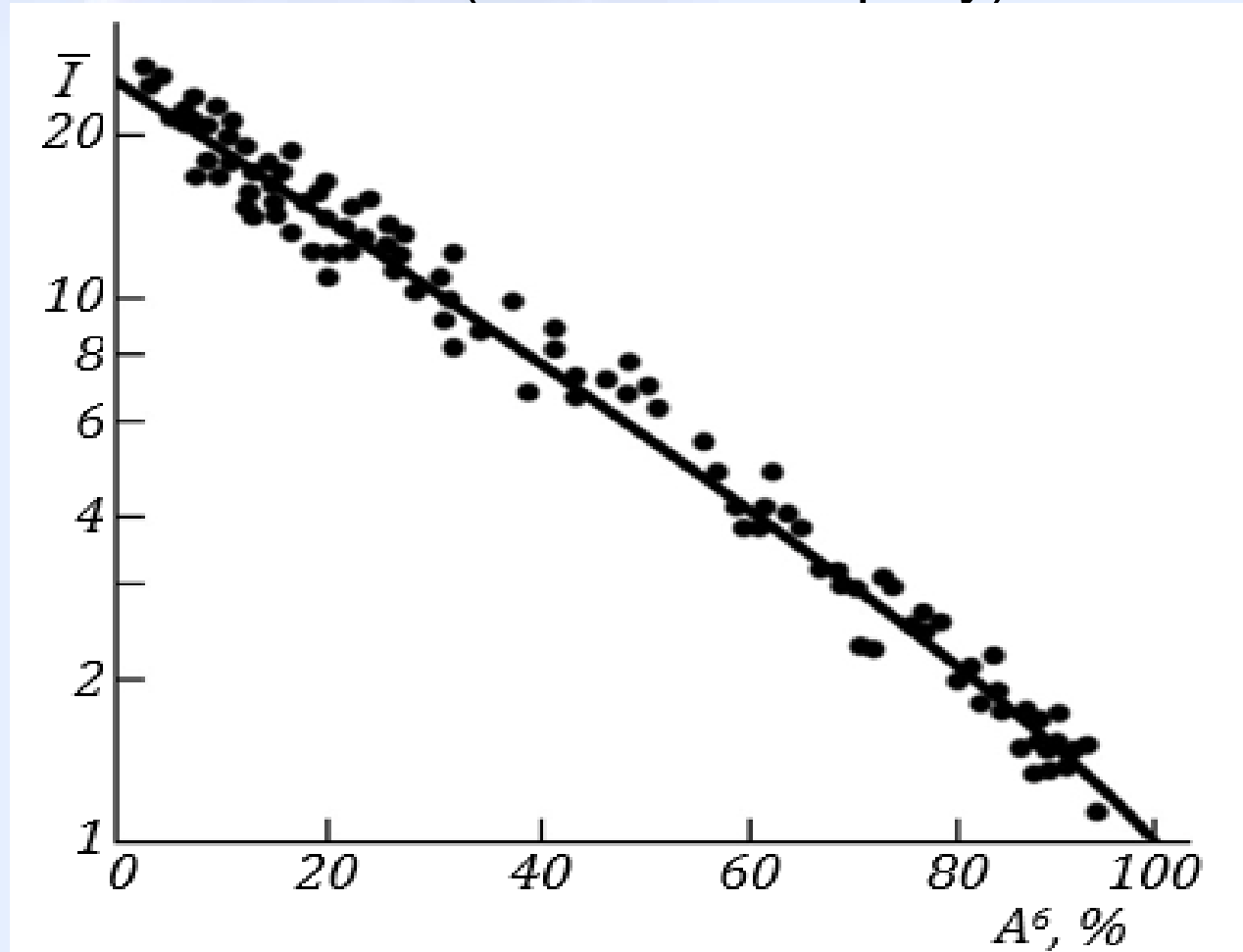
Широкое применение находит так называемый микроселективный гамма-гамма каротаж, реализуемый с коллимированным зондом малого размера ($R=5$ см) и источником америций-241 (60 кэВ).

Геометрия зонда выбрана такой, чтобы центр рассеивающей области, видимый детектором, находился в среде по линии движения первичных гамма-квантов на несколько большем расстоянии, нежели длина свободного пробега во вмещающей породе.

Поскольку вклад многократно рассеянного излучения при малой E_0 мал, показания от вмещающей породы будут низкими.

При попадании зонда в угольный пласт из-за большей длины свободного пробега центр рассеивающей области оказывается в зоне видимости детектора, что и обеспечивает хорошую контрастность диаграмм микроселективного каротажа и высокую расчленяющую способность в сравнении с обычными зондами ГГК-С.

Зависимость данных мкгГКС от зольности углей Донбасса
(по А.Н. Макарову)



Основным возмущающим фактором при постановке метода для количественного контроля качества углей является изменчивость минерального остатка.

Учет и компенсация дестабилизирующего действия элементного состава при определении зольности представляет сложную в методическом плане задачу.

Полиметаллические руды.

Полиметаллические руды в своем большинстве многокомпонентны и в них присутствуют ряд элементов с близкими атомными номерами.

Поэтому, как правило, нет четкой взаимосвязи между содержанием даже одного из тяжелых элементов и Z руды.

В рудах свинца сопутствующими элементами являются железо, цинк, мышьяк.

Задача идентификации свинца и учета влияния элементов со средними Z может решаться с помощью зондов, использующих явление инверсии и спектрометрического варианта, учитывающего особенности вторичного гамма-спектра вблизи K -скачка поглощения свинца.

В зондах первого типа снижение влияния матричного эффекта связано с компенсирующим действием фотоэлектрического поглощения гамма-излучения и накоплением рассеянного излучения за счет соответствующего роста электронной плотности.

При этом результаты селективного метода будут преимущественно обусловлены содержанием свинца. Естественно, что область применения зондов ограничена случаями, когда между содержанием мешающих элементов и плотностью руд наблюдается пропорциональность.

Содержание элемента-примеси $q_{\text{ЭКВ}}$, эквивалентное 1% определяемого элемента

Руды	Основной рудный элемент	Сопутствующий элемент	
		Наименование	Эквивалентное содержание, %
Полиметаллические	Pb	Ca	65
		Fe	28
		Zn	19
		Cu	21,5
		Sn	4,3
		Ba	3,0
Ртутные	Hg	Sb	4,0
		Ba	2,8
Вольфрамовые	W	Fe	20,0
		Mo	5,5
		Sn	3,2
Сурьмяные	Sb	Fe	7,0
		Ba	0,8
		Hg	0,25
Железные	Fe	Ca	2,5
		Ti	1,5
		Mn	1,25

Контрольные вопросы

1. В чем принципиальные отличия селективного ГГМ от плотностного ГГМ?
2. Основные задачи, решаемые ГГМ-с.
3. Укажите основные требования, при выполнении которых можно определять содержание тяжелых элементов в горных породах и рудах.
4. Что такое Z среды? Как рассчитать Z сложного вещества.
5. Основные факторы, влияющие на показания ГГМ-с.
6. Суть и назначение сложных зондовых устройств, применяемых в ГГМ-с.
7. Как рассчитать поток рассеянных гамма-квантов от сложной среды в приближении однократного взаимодействия?
8. Что такое глубинность ГГМ-с? От каких параметров зависит глубинность. Как экспериментально оценить глубинность?
9. Что такое чувствительность ГГМ-с? Факторы, влияющие на чувствительность. Как оценить чувствительность метода экспериментальным путем с поэтапным выполнением необходимых действий?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. На какие важные метрологические характеристики влияет выбор энергии первичного гамма-излучения в ГГМ-п?
2. Что такое аппаратурный спектр рассеянного гамма-излучения. Как измерить спектр на практике?
3. Суть и назначение спектрометрической модификации селективного гамма-гамма метода.
4. На чем основана возможность определения качества железных руд ГГМ-с?
5. На чем основана возможность определения качества углей?

Список литературы

1. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. – М.: Атомиздат, 1980, 321 с.
2. Якубович А.Л., Зайцев Е.И., Пржиялговский С.М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. – М.: Атомиздат, 1982.
3. Мейер В.А., Ваганов П.А., Пшеничный Г.А. Методы ядерной геофизики. – Л.: Изд-во ЛГУ. 1988. – 376 с.
4. Старчик Л.П., Пак Ю.Н. Ядерно-физические методы контроля качества твердого топлива. – М.: Недра, 1985. – 224 с.
5. Ларионов В.В. Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.
6. Резванов Р. Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. – М.: Недра, 1982.
7. Филиппов Е.М. Ядерная геофизика. Т.2. – Новосибирск: Изд-во Наука. Сибирское отд., 1973. – 400 с.
8. Ю.Н. Пак. Ядерные технологии в геофизических исследованиях. Изд-во КарГТУ, 346с. Учебник, 2016.
9. Пак Д.Ю., Пак Ю.Н. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях, Издательство КарГТУ, 106с, Учебное пособие, 2018.
10. Пак Д.Ю. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях (часть 2), Издательство КарГТУ, 103с, Учебное пособие, 2019.
11. Пак Ю.Н., Пак Д.Ю. Монография. Методы и приборы ядерно-физического анализа углей. Изд-во КарГТУ, Караганда, 2012.
12. Пак Ю.Н. Пак Д.Ю. Геологиялық-геофизикалық зерттеулердегі ядролық-радиометриялық әдістер бойынша зертханалық практикум. Издательство КарГТУ, 107с, Учебное пособие, 2020.

На этом лекция завершена.
Спасибо за внимание!