

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

Лекция

Физические основы рентгенорадиометрического метода

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



План лекции:

1. Физические основы РРМ.
2. Способы повышения избирательности рентгенорадиометрического метода.
3. Влияние геометрических условий.
4. Оптимизация параметров и применяемая аппаратура РРМ.
5. Энергетическая градуировка и методика эталонирования аппаратуры.
6. Практика рентгенорадиометрического метода в геолого-геофизических исследованиях

Общие сведения

Рентгенорадиометрический метод относится к группе гамма-методов. Он основан на облучении горных пород и руд потоком гамма-излучения и регистрации рентгеновского флуоресцентного излучения элементов. При реализации метода помимо рентгеновской флуоресценции определяемого элемента используют рассеянное гамма-излучение для введения поправок на флуктуации вещественного состава и плотности вмещающих пород и других факторов.

К основным достоинствам рентгенорадиометрического метода, обеспечивающим его высокую геолого-экономическую эффективность, относятся простота и компактность анализирующей аппаратуры, возможность экспрессного неразрушающего контроля содержания многих элементов в различных условиях: на поверхности естественных обнажений и горных выработок, в стенках скважины и порошковых пробах.

Физические основы РРМ

Возбуждение рентгеновского флуоресцентного излучения элемента происходит в результате фотоэффекта. Энергия первичных гамма-квантов должна превышать потенциал ионизации соответствующей электронной оболочки атома.

В результате фотоэффекта с одной из ближайших к ядру электронных оболочек (K или L) вырывается электрон и атом оказывается в возбужденном состоянии. Возбужденное состояние атома неустойчиво и он возвращается в нормальное состояние путем каскада различных переходов, в процессе которых вакантное место заполняется электроном с дальних оболочек. При этом избыток энергии уносится из атома фотонами рентгеновской флуоресценции.

Это излучение относится к разряду электромагнитных излучений, распространяется изотропно и имеет линейчатый спектр.

Особенностью флуоресцентного излучения элемента является строгая однозначная связь его энергии E_x от положения элемента в периодической таблице. Взаимосвязь между энергией E_x и атомным номером определяется законом Мозли, согласно которому:

$$\sqrt{E_x} \sim Z$$

Для каждого элемента энергия его флуоресцентного излучения строго фиксирована, т.е. энергия является в определенной степени характеристикой элемента. По этой причине флуоресцентное излучение в геофизике называют характеристическим излучением.

Интенсивность рентгеновской флуоресценции определяемого элемента Z с точностью до постоянных сомножителей в приближении однократного взаимодействия первичного гамма-излучения можно оценить из соотношения

$$N_i = kN_o W_K \frac{S_K^{-1}}{S_K} \mu_\phi^Z \cdot m (\mu_o + \mu_i)^{-1},$$

где W_K – коэффициент выхода флуоресценции определяемого элемента;
 S_K – величина К-скачка поглощения элемента;
 μ_ϕ^Z – массовый коэффициент фотоэлектрического поглощения первичного гамма-излучения определяемым элементом;
 m – содержание определяемого элемента в среде;
 μ_o, μ_i – полный массовый коэффициент ослабления, соответственно первичного и флуоресцентного излучений средой.

Таким образом, однозначность энергии характеристического излучения элемента его атомному номеру и пропорциональность интенсивности этого излучения от содержания элемента в среде являются физическими основами рентгенорадиометрического метода.

Характеристическое излучение, испускаемое атомом при фотоэлектрическом поглощении первичных гамма-квантов, является сложным по энергии.

Если выбит электрон из K -оболочки, то возникает K -серия характеристического излучения элемента, которая состоит из ряда линий. Причем энергия линий равна разности энергий соответствующих уровней.

Если интенсивность α_1 -линии K -серии характеристического излучения принять за 100 %, то относительные интенсивности других линий этой серии будут равны

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \beta_1 : \beta_2 = 100 : 50 : 25 : 5.$$

Наиболее яркой во вторичном характеристическом спектре является α_1 -линия, которая обычно и используется в рентгенорадиометрическом методе.

Очевидно, что для возбуждения К-серии рентгеновской флуоресценции элемента необходимо превышение энергии первичного гамма-излучения над потенциалом ионизации К-оболочки элемента.

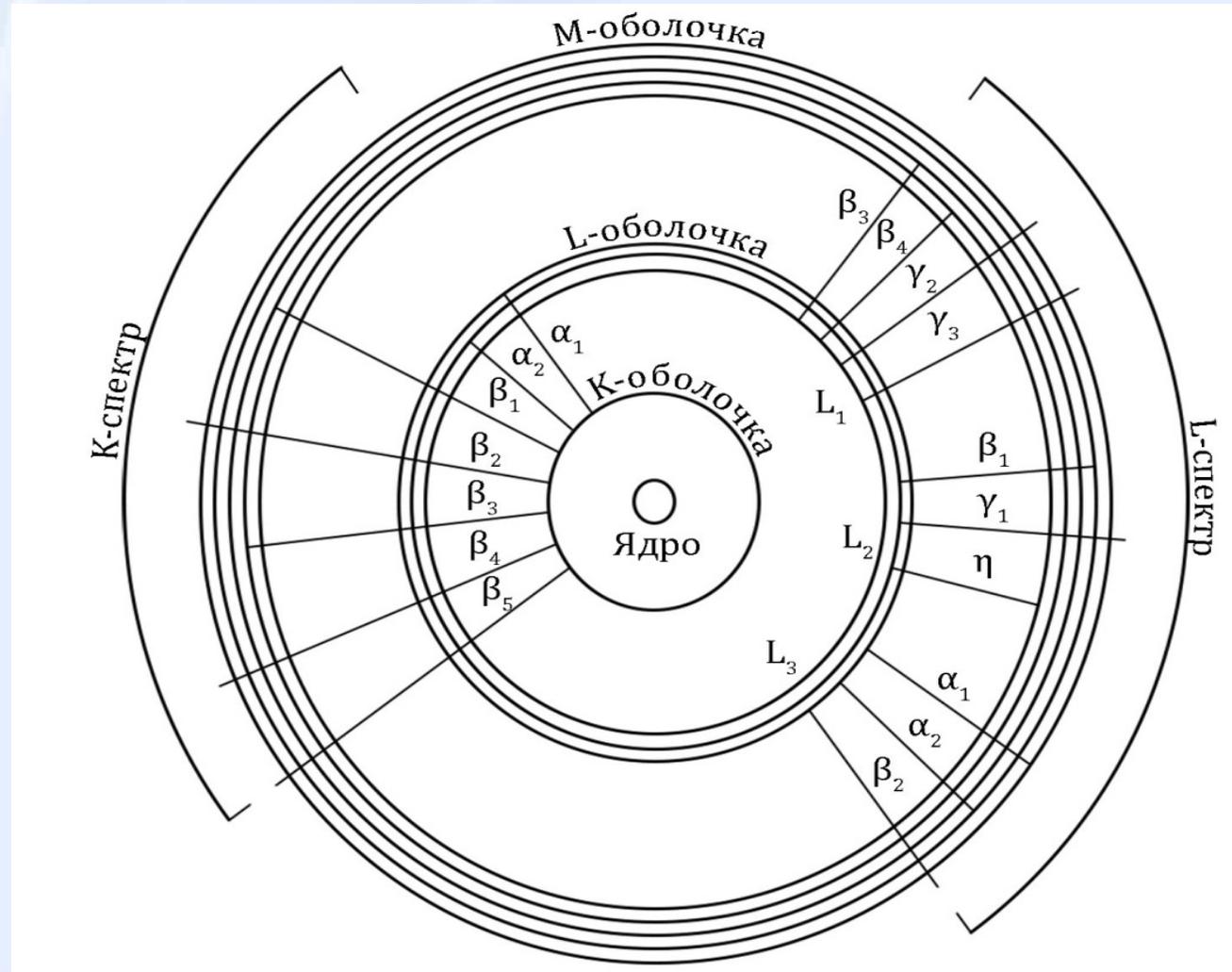
В практике рентгенорадиометрического контроля, выбор оптимальной энергии первичного гамма-излучения, как правило, осуществляют исходя из условия:

$$3E_K > E_0 > 1E_K,$$

обеспечивающего достаточную эффективность возбуждения и чувствительность анализа.

При рентгенорадиометрическом исследовании руд тяжелых элементов можно использовать L-серию характеристического излучения элемента, которая испускается при заполнении L-оболочки атома.

Модель атома и схема основных переходов для *K*- и *L*-серий характеристического рентгеновского излучения



Не каждый атом, возбужденный в результате фотоэффекта на какой-либо уровень, испускает кванты характеристического излучения. Выход квантов флуоресцентного излучения характеризуется коэффициентом, называемым отдачей флуоресценции, которая представляет собой отношение числа атомов элемента, испустивших рентгеновский квант той или иной серий, к общему числу атомов этого элемента, возбужденных на соответствующий уровень.

Отдача флуоресценции зависит от атомного номера элемента и для каждого элемента является постоянной величиной.

Для K -уровня выход флуоресценции определяется по следующей полуэмпирической формуле:

$$W_K = \frac{Z^4}{Z^4 + 32,2^4}.$$

Таблица – Энергии K -краев поглощения и рентгеновских линий K -серий элементов, кэВ и массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения слева и справа от K -скачка поглощения, $\text{см}^2/\text{г}$

Z	Элемент	E_K	$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\beta 1}$	$\mu(E_K - 0)$	$\mu(E_K + 0)$
13	Al	1,559	1,487	1,486	1,553	355	4890
14	Si	1,838	1,740	1,739	1,829	296	3900
16	S	2,472	2,308	2,306	2,464	203	2460
20	Ca	4,038	3,691	3,687	4,012	108	1140
22	Ti	4,965	4,510	4,504	4,931	76,2	762
25	Mn	6,540	5,898	5,887	6,489	53,3	492
26	Fe	7,112	6,403	6,390	7,057	49,0	442
29	Cu	8,979	8,046	8,026	8,904	36,0	302
30	Zn	9,659	8,637	8,614	9,570	33,0	272
40	Zr	17,998	15,772	15,688	17,655	14,5	99
42	Mo	20,002	17,476	17,371	19,605	12,6	84,1
47	Ag	25,514	22,159	21,987	24,983	9,32	57,5
48	Cd	26,711	23,170	22,980	26,091	8,36	52,2
50	Sn	29,200	25,267	25,040	28,481	7,61	44,9
51	Sb	30,491	26,355	26,106	29,721	7,17	41,8
56	Ba	37,441	32,188	31,812	36,372	5,44	29,6
74	W	69,524	59,308	57,972	67,233	2,51	11,2
82	Pb	88,006	74,956	72,792	84,922	1,85	7,65
83	Bi	90,527	77,095	74,802	87,328	1,79	7,32

Выход флуоресценции возрастает с повышением атомного номера элемента (таблица). Так, например, если для железа выход составляет около 30 %, то для серебра он превышает 80 %.

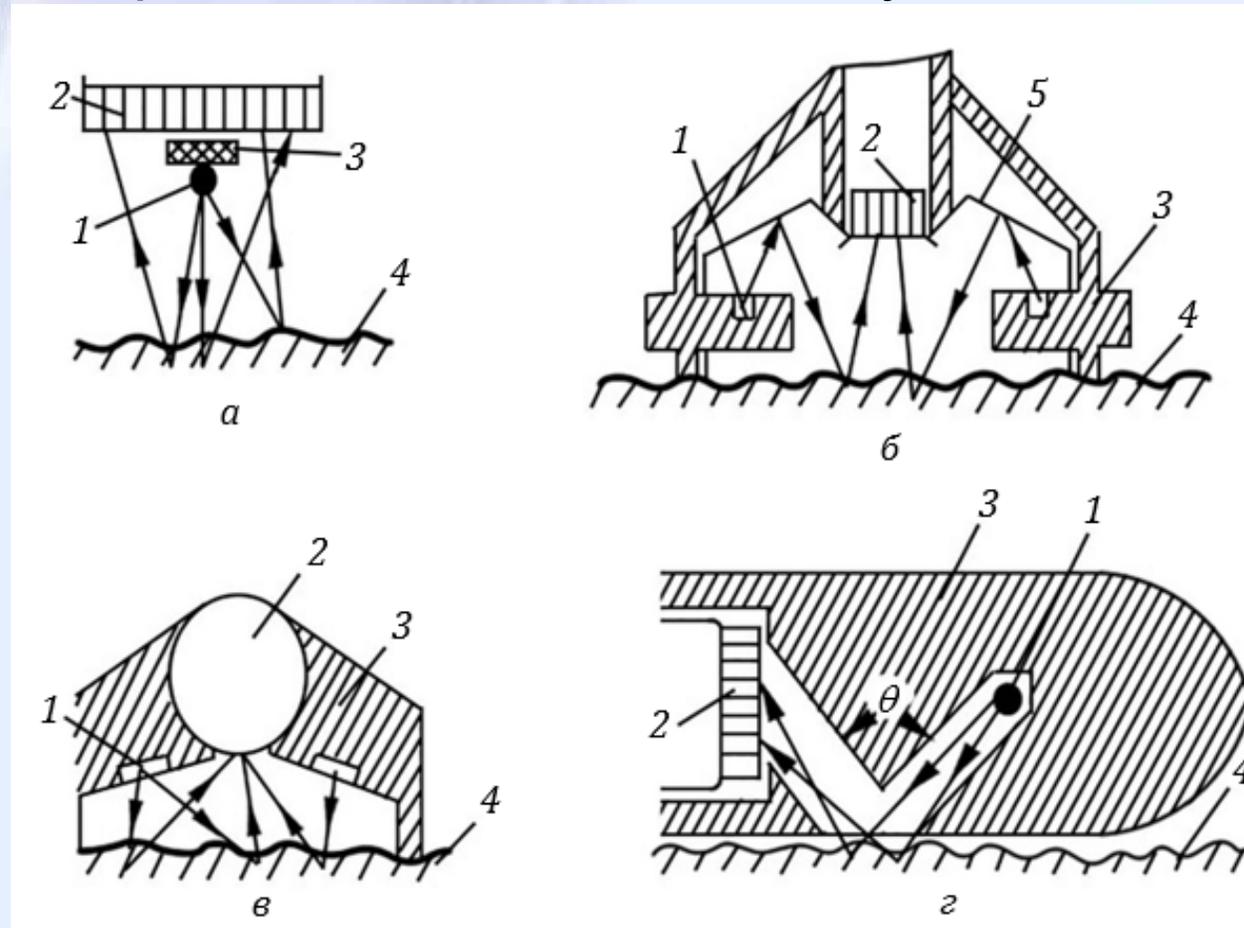
Таблица – Выходы флуоресценции для *K* и *L* серий излучения

Z	Элемент			Z	Элемент			Z	Элемент		
20	Ca	0,163	-	37	Rb	0,669	0,010	54	Xe	0,889	0,11
22	Ti	0,219	-	40	Zr	0,730	0,057	55	Cs	0,895	0,09
24	Cr	0,282	0,003	41	Nb	0,748	-	56	Ba	0,901	0,09
25	Mn	0,314	-	42	Mo	0,764	0,067	73	Ta	0,956	0,23
26	Fe	0,347	-	47	Ag	0,830	0,056	74	W	0,957	0,30
28	Ni	0,414	-	48	Cd	0,840	-	80	Hg	0,966	0,39
29	Cu	0,445	0,006	50	Sn	0,859	-	82	Pb	0,968	0,38
30	Zn	0,479	-	51	Sb	0,867	0,12	83	Bi	0,976	0,41
36	Kr	0,646	0,010								

Рентгенорадиометрический метод реализуется только в геометрии прямой видимости. Под геометрией прямой видимости понимают такое расположение источника и детектора относительно объекта исследования, при котором детектор «видит» всю или часть поверхности среды, непосредственно облучаемой источником.

Измерения в такой геометрии могут проводиться как с коллимацией первичного и вторичного излучений, так и без нее. Понятие о геометрии прямой видимости не очень удачно, т.к. не раскрывает особенностей механизма возникновения вторичного излучения. Здесь важно подчеркнуть исключительную роль однократного взаимодействия в формировании вторичного рентгеновского поля.

Геометрические схемы, используемые в РРМ



Зонды: а - с центральной геометрией; б- с боковым размещением источника, в - с рентгеновским источником; г - с коллиматорами: 1 – источник, 2 – детектор; 3 – защита; 4 – изучаемая среда; 5 – мишень

Способы повышения избирательности рентгенорадиометрического метода

Одной из сложных задач при рентгенорадиометрическом анализе элементов с близкими атомными номерами является выделение и отдельная регистрация характеристических излучений этих элементов.

Существование такой задачи связано с конечным энергетическим разрешением сцинтилляционных и пропорциональных детекторов гамма-излучения.

Повысить избирательность рентгенорадиометрического метода можно с помощью селективного фильтра, представляющего тонкую пластину, размещаемую перед детектором.

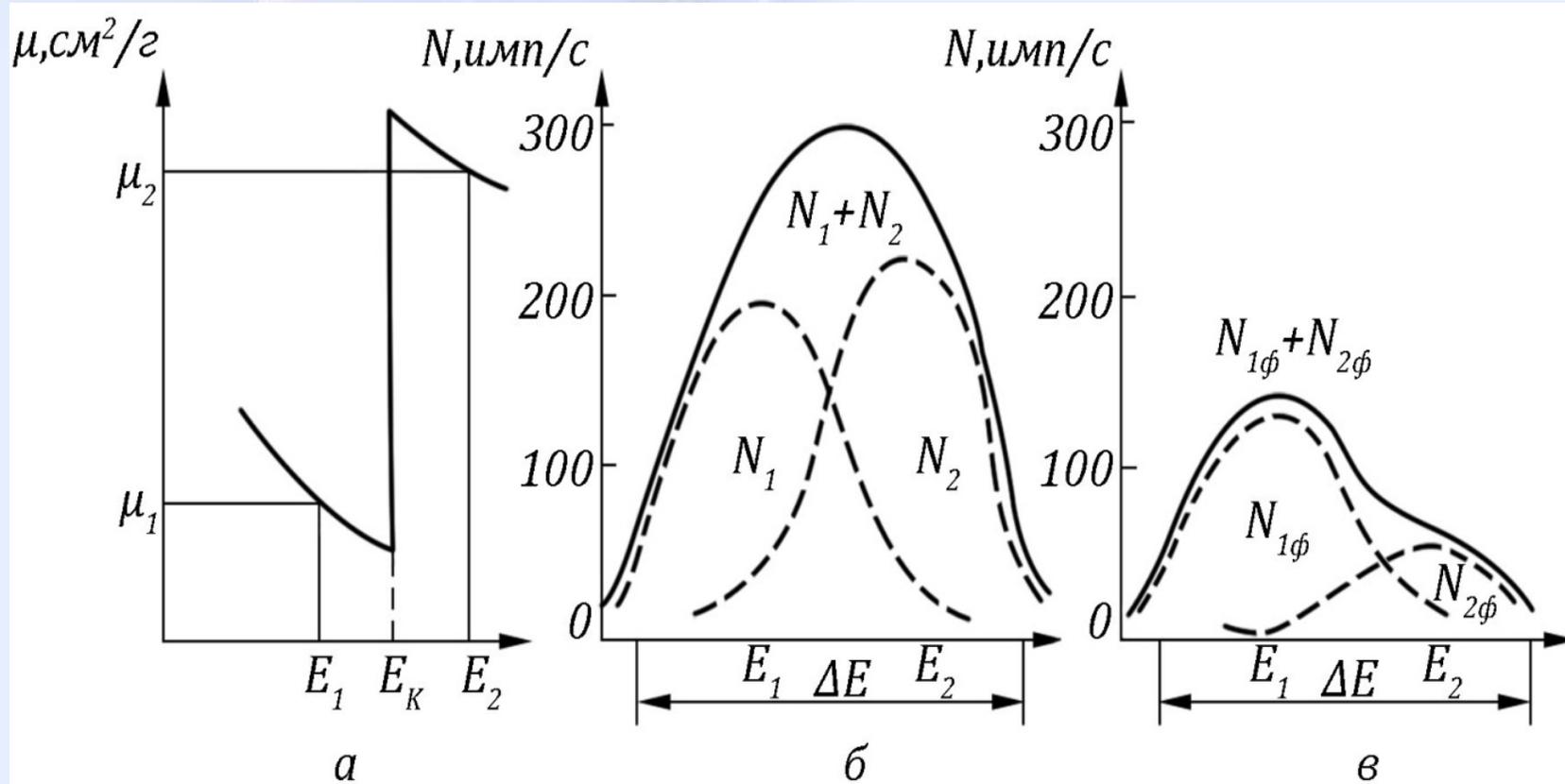
Действие избирательного фильтра основано на резко различном ослаблении фильтрующим материалом излучений с энергией чуть менее и чуть более энергии K -края поглощения фильтра.

Пусть в сложной среде помимо наполнителя находятся два элемента с близкими атомными номерами, например, марганец ($Z=25$) и железо ($Z=26$). Энергии характеристических излучений этих элементов соответственно равны 5,9 кэВ и 6,4 кэВ. Для отдельной регистрации этих квантов необходимо выбрать фильтр из такого материала, у которого энергия K -края поглощения лежит внутри интервала между энергиями характеристических излучений двух элементов.

Если в качестве материала выбран хром, у которого $E_K = 6$ кэВ, то характеристическое излучение марганца (5,9 кэВ) и железа (6,4 кэВ), проходя через такой фильтр, ослабляются резко различно.

Поэтому при прохождении излучений с энергией фотонов E_1 и E_2 через пластинку из фильтрующего элемента с поверхностной плотностью $(\rho \cdot x)$ относительная интенсивность излучений меняется.

Принцип действия селективного фильтра



а – зависимость массового коэффициента поглощения для фильтрующего элемента от энергии фотонов; аппаратурные спектры при регистрации излучений E_1 и E_2 без фильтра (*б*) и с фильтром (*в*)

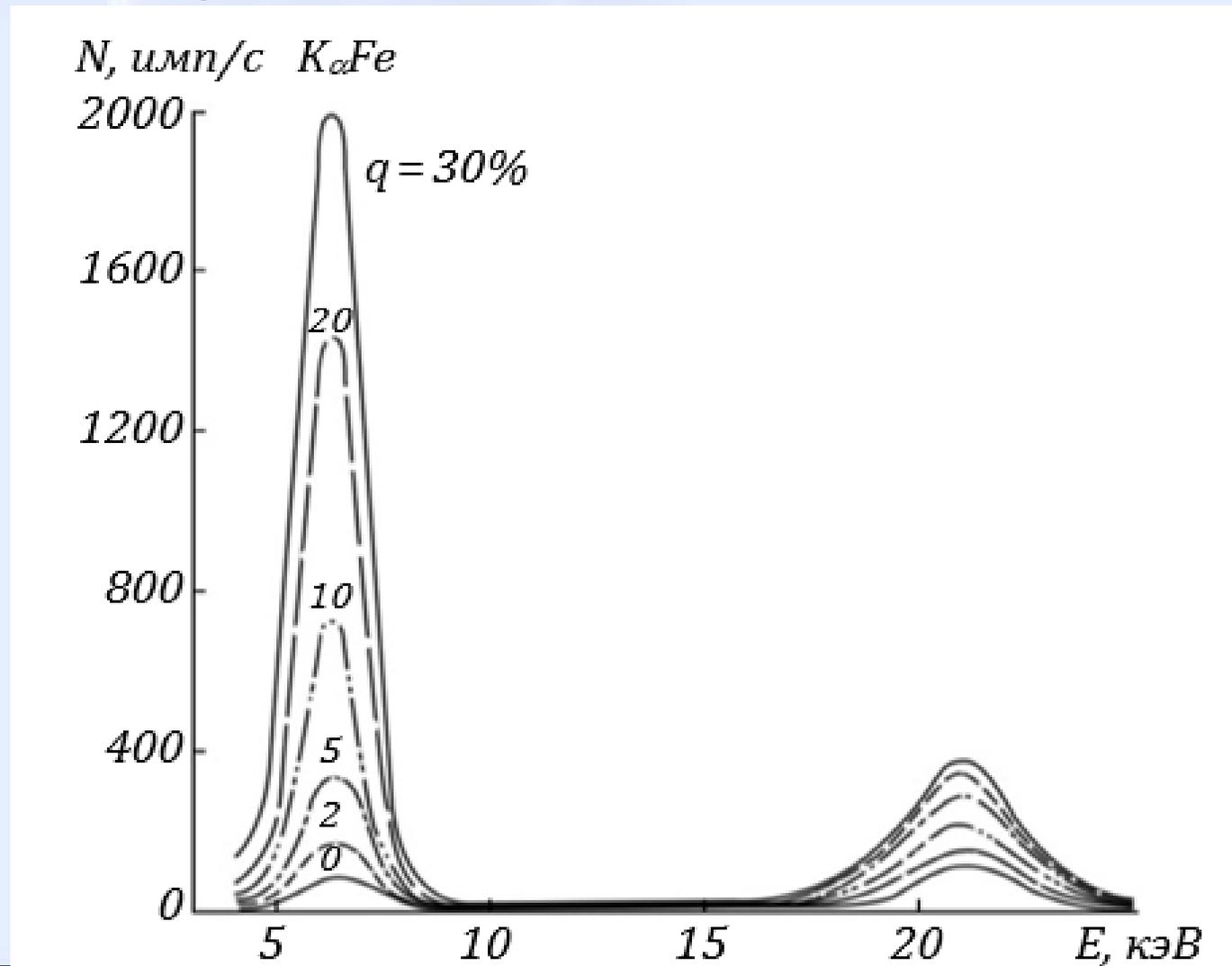
Оптимальная поверхностная плотность селективного фильтра зависит от значений массовых коэффициентов ослабления μ_1 , μ_2 от относительного вклада характеристических излучений в суммарную интенсивность.

Роль селективного фильтра в избирательном подавлении более высокоэнергетических фотонов видна на рисунке (б, в), где качественно изображены аппаратурные спектры при регистрации излучений с E_1 и E_2 без фильтра и с фильтром.

Эффективность селективного фильтра будет тем выше, чем ближе друг к другу энергии характеристических излучений определяемых элементов, при которых существенно различие в коэффициентах ослабления этих излучений материалом фильтра.

Если в исследуемой среде присутствуют более двух элементов с близкими атомными номерами, то задача выделения характеристического излучения одного из элементов с целью количественного определения его содержания не решается даже с помощью селективного фильтра.

Вторичные спектры, полученные с источником кадмий-109 на моделях с разными массовыми долями железа



Аналитический параметр, по которому в способе спектральной интенсивности определяется концентрация элемента, имеет вид:

$$N_i = N'_i - m_s N_s,$$

где N_i – интенсивность рентгеновской флуоресценции определяемого элемента;

N'_i – интенсивность излучения в энергетической области, соответствующей энергии флуоресцентного излучения определяемого элемента;

m_s – поправочный коэффициент, учитывающий вклад рассеянных гамма-квантов в области аналитической линии определяемого элемента;

N_s – интенсивность рассеянного гамма-излучения в пике однократного рассеяния.

Несмотря на относительную простоту аппаратной реализации способ спектральной интенсивности находит применение лишь в случае, когда матричный эффект оказывает незначительное влияние на показания способа.

Способ спектральных отношений нашел широкое применение при реализации рентгенорадиометрического метода в условиях естественного залегания пород и руд, а также для экспрессного анализа порошковых проб.

Сущность способа состоит в регистрации рассеянного средой гамма-излучения, как внутреннего стандарта для учета вариаций вещественного состава вмещающих пород.

Аналитическим параметром в этом способе служит отношение интенсивностей рентгеновской флуоресценции определяемого элемента и рассеянного средой первичного гамма-излучения. Способ спектральных отношений впервые предложен В.А. Мейером и В.С. Нахабцевым при рентгенорадиометрическом каротаже скважин.

Способ является основным при аппаратурной реализации РРМ в условиях действия ряда возмущающих факторов (вариации Z и плотности среды, геометрии измерения).

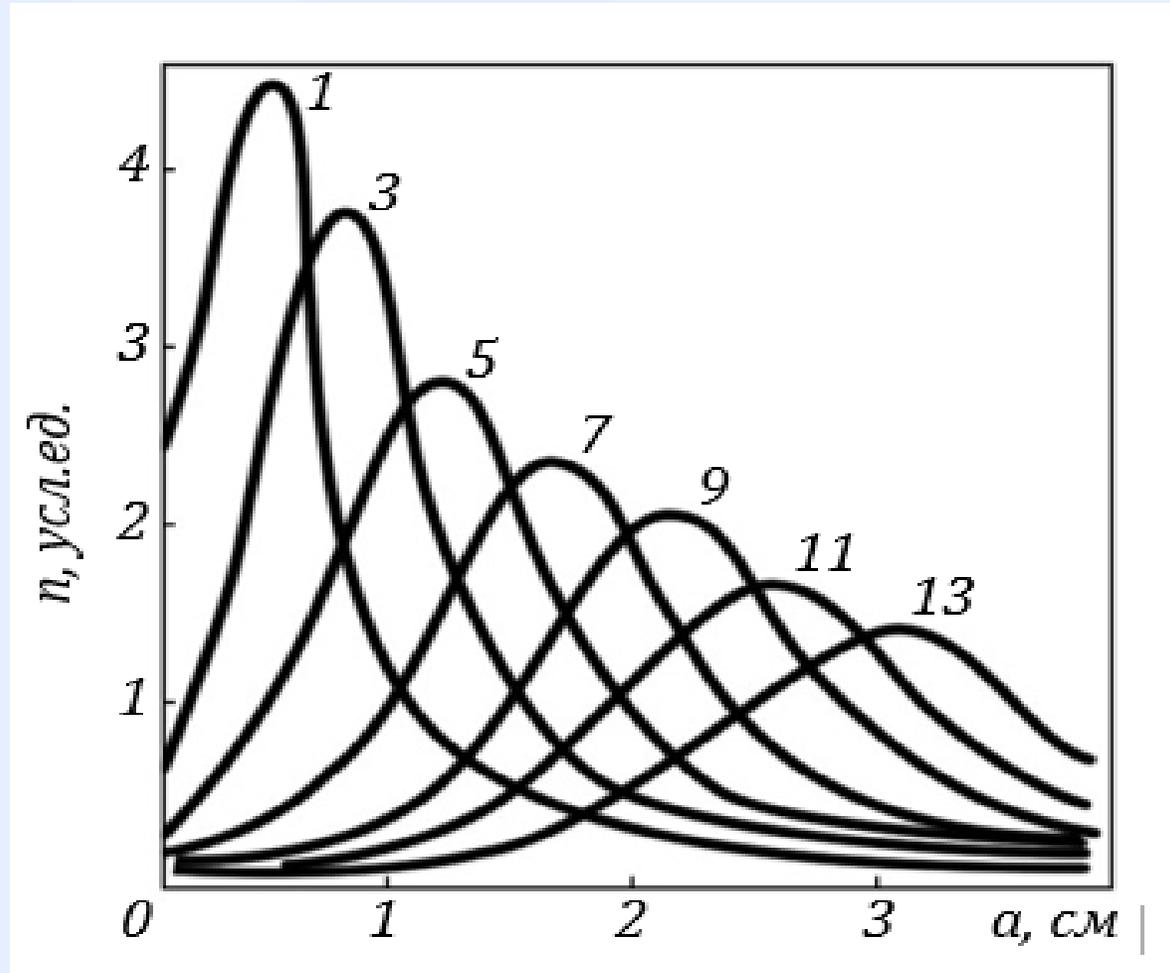
Влияние геометрических условий

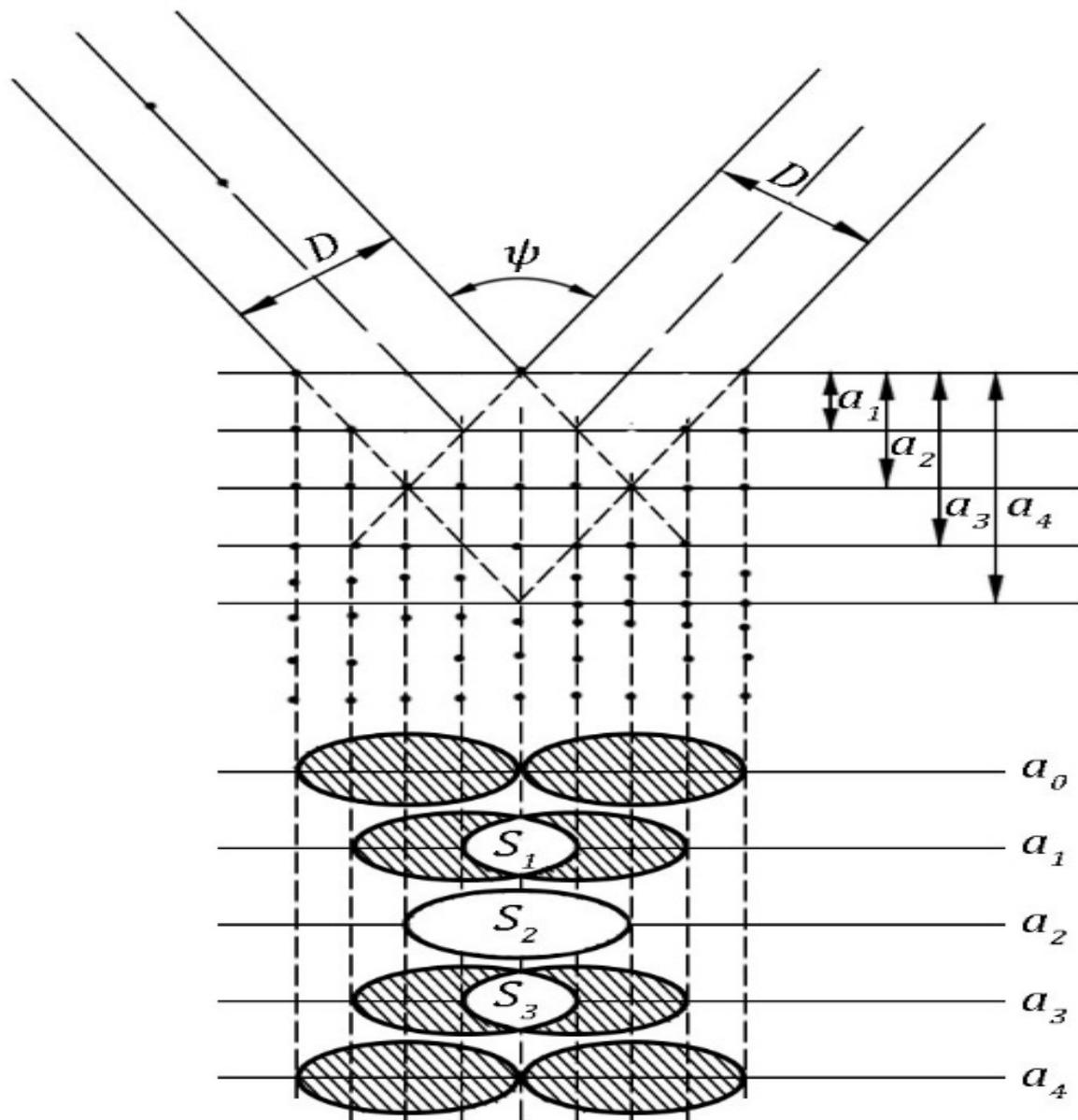
В РРМ результаты измерений существенно зависят от расстояния между зондом и поверхностью исследуемой среды. В лабораторной практике это расстояние можно строго фиксировать. При реализации метода в условиях естественного залегания невозможно сохранить постоянным расстояние от зонда до объекта исследования, что вносит помехи в результаты измерений.

Перспективным в смысле устранения таких искажений является использование сложных зондовых устройств, работающих по принципу, сходному с ГГМ-С. Такие зондовые устройства основаны на использовании инверсии зависимости регистрируемой интенсивности характеристического излучения от расстояния зонд-среда.

Явление геометрической инверсии заключается в том, что по мере увеличения расстояния от зонда до среды вначале поток квантов характеристического излучения возрастает, достигает максимума и с дальнейшим удалением зонда поток снижается.

Зависимости скорости счета в области энергии K -излучения ртути от расстояния между прибором и поверхностью для сред, содержащих 10% ртути. Шифр кривых – расстояние между выходными отверстиями цилиндрических коллиматоров, см





Изменение площади «прямой видимости» S в зависимости от расстояния a между датчиком прибора и поверхностью исследуемой среды. Геометрия коллимированных пучков излучений.

Оптимизация параметров и применяемая аппаратура РРМ

При реализации рентгенорадиометрического метода, в частности, для количественного контроля содержания того или иного элемента особое значение имеет правильный выбор ширины энергетического окна в области аналитической линии определяемого элемента.

Актуальность этой задачи состоит в том, что в зависимости от ширины окна ΔE в области аналитической линии меняются такие важные параметры, как относительная чувствительность метода и статистическая погрешность измерений.

Например, уменьшение ΔE приводит к снижению числа фоновых квантов, а следовательно, к повышению чувствительности метода к определяемому параметру.

Повышение чувствительности и увеличение статистической погрешности качественно обратно воздействуют на основной метрологический параметр – точность анализа. Это делает необходимым оптимизировать выбор ширины окна при рентгенорадиометрическом анализе.

При выборе оптимальной ширины энергетического окна в качестве минимизируемого параметра выбрана величина относительной статистической погрешности, выраженная в долях содержания определяемого элемента:

$$\Phi = \frac{V}{S},$$

где $V = \frac{\sqrt{N}}{N}$ - относительная статистическая погрешность;

S – относительная чувствительность метода.

Энергетическая градуировка и методика эталонирования аппаратуры

Для реализации РРМ используется спектрометрическая аппаратура, позволяющая измерить спектр излучения, представляющий зависимость числа частиц от их энергии.

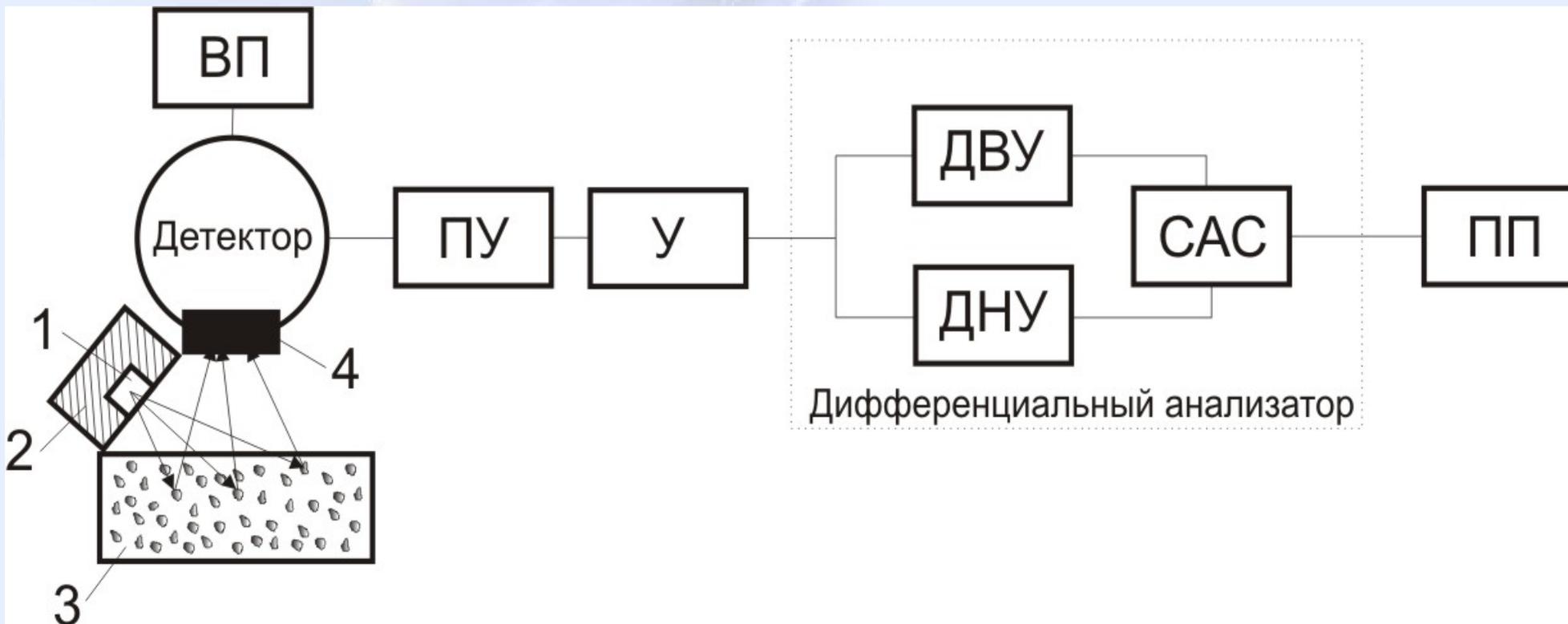
Таким образом, гамма-спектрометр – это прибор, предназначенный для исследования спектра гамма-излучения или в простейшем случае для избирательной регистрации гамма-квантов в определенном интервале энергии.

Основными частями спектрометра являются детектор, амплитуда импульсов на выходе которого пропорциональна энергии регистрируемого излучения, и амплитудный анализатор. Амплитудные анализаторы бывают интегральными и дифференциальными.

Интегральный дискриминатор выделяет импульсы с амплитудой выше некоторого заданного порога, а дифференциальный – импульсы в некотором интервале амплитуд.



Блок схема гамма-спектрометра



1-источник первичного γ - излучения; 2- защитный коллиматор; 3-исследуемая среда; 4-окно детектора; ВП- высоковольтный преобразователь; ПУ- предварительный усилитель; У- усилитель; ДНУ- дискриминатор нижнего уровня; ДВУ- дискриминатор верхнего уровня; САС- схема антисовпадений; ПП- пересчетный прибор

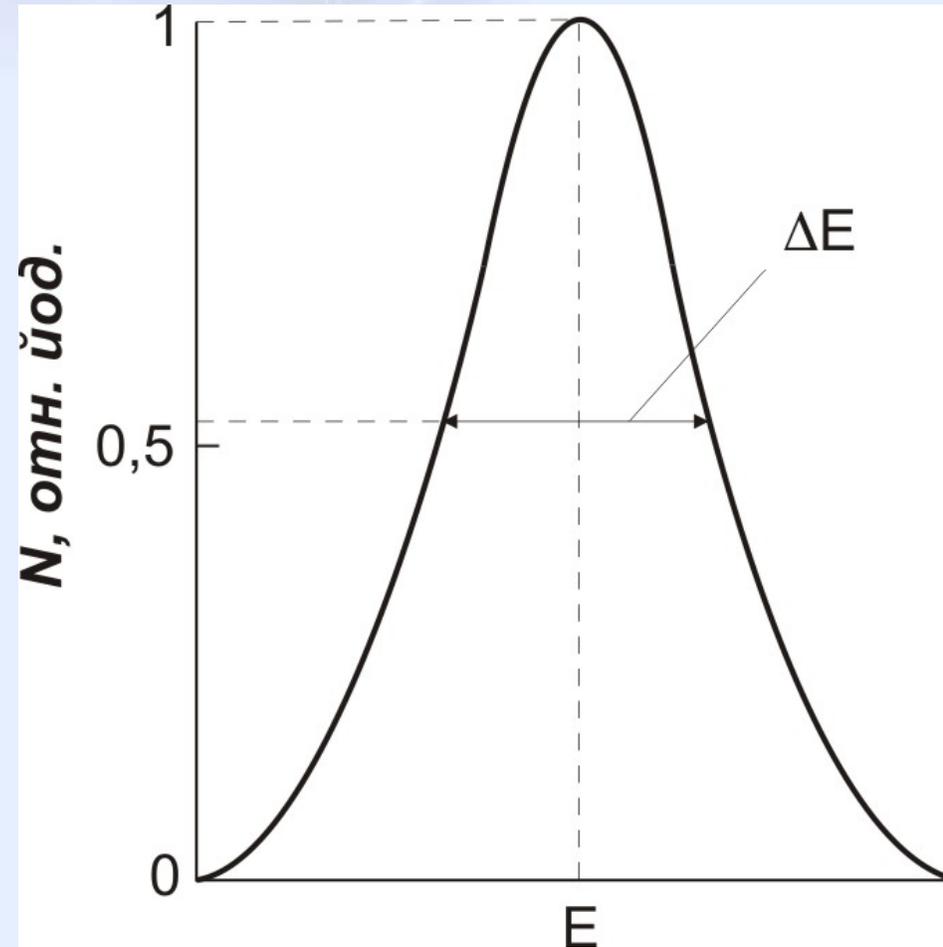
Работу гамма-спектрометра можно описать следующим образом. Первичное гамма-излучение от источника падает на исследуемую среду. В детектор могут попадать кванты характеристического излучения элемента, возникающие в среде за счет фотоэлектрического поглощения первичных гамма-квантов, а также рассеянные средой гамма-кванты. Энергии этих видов излучений различны, следовательно, на выходе детектора будут импульсы с различной амплитудой.

Предварительный усилитель и усилитель служат для согласования и усиления импульсов по амплитуде. На вход анализатора поступают импульсы различной амплитуды. Задача анализатора сделать отбор импульсов по амплитудам, а пересчетный прибор фиксирует число импульсов.

Для снятия спектра вторичного излучения устанавливают минимальную ширину окна ΔU . Последовательно изменяя уровень дискриминации, измеряют число импульсов.

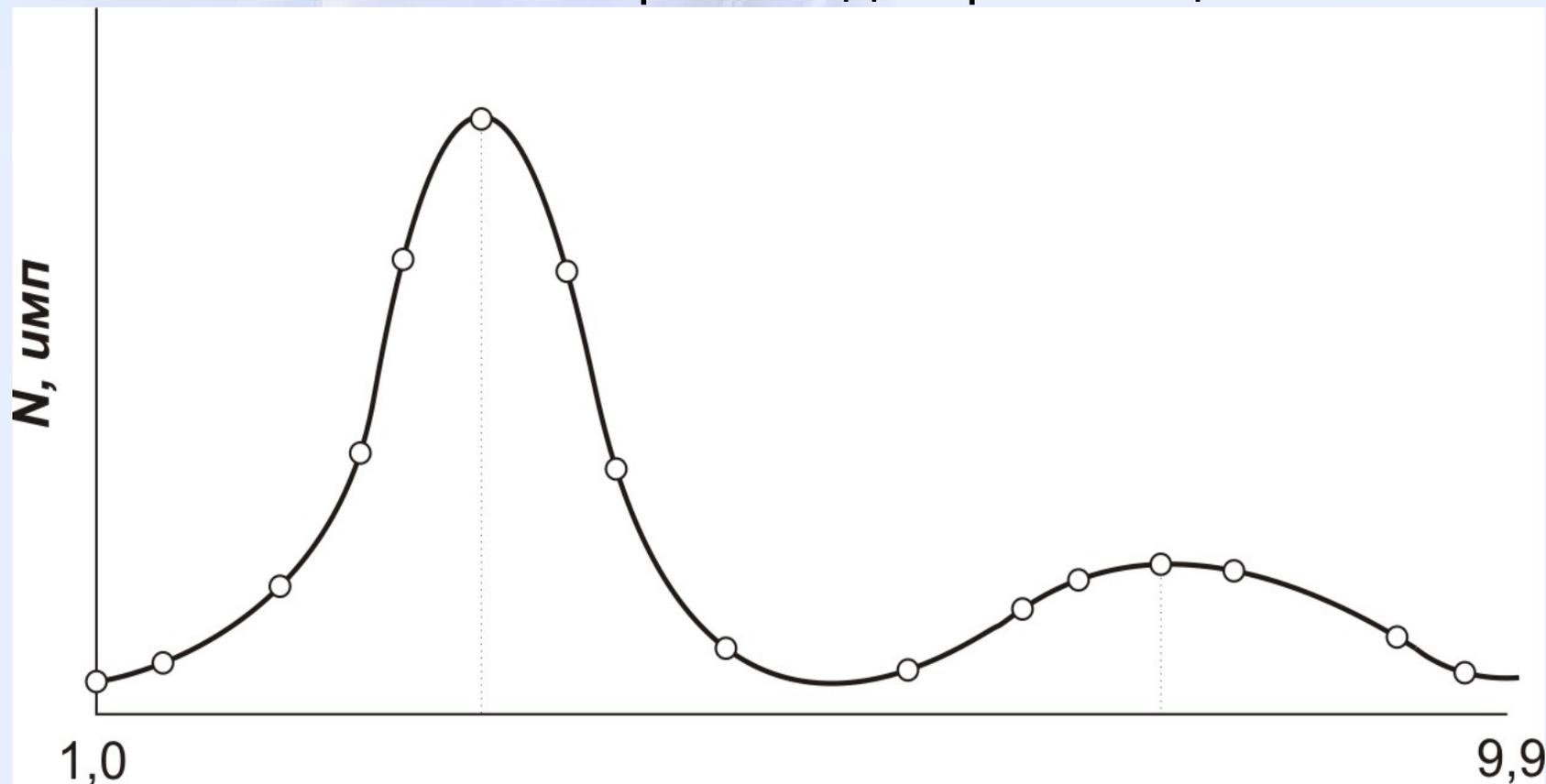


Энергетический спектр





Уровень дискриминации



Как правило в спектре помимо пика характеристического излучения элемента будет наблюдаться и пик рассеянного гамма-излучения, энергию которого можно найти по формуле Комптона.



Пример энергетической градуировки



Выполнить энергетическую градуировку можно просто при наличии двух источников с различной энергией. Источники выбирают такими, чтобы энергии гамма-излучения перекрывали весь рабочий диапазон энергий.

Если анализируемые элементы испускают характеристическое излучение с энергиями 6-20 кэВ, то для градуировки целесообразно выбирать гамма-излучатели с энергиями в этом диапазоне, например, источники Fe-55 (5,9 кэВ) и Cd-109 (22 кэВ).

Выбранные источники поочередно размещают в коллиматоре и направляют прямое излучение непосредственно на детектор. При этом снимают спектр источника. Если источник испускает монохроматическое излучение, то в спектре будет наблюдаться только один пик. Зная положение этого пика и энергию излучения источника, можно аналогично предыдущему способу построить градуировку.

Таким образом, энергетическая градуировка позволяет по измеренным аппаратурным спектрам оценить энергию характеристического излучения элемента, а следовательно, и наличие того или иного элемента, т.е. провести качественный анализ среды.

Например, ставится задача определить наличие серебра в горной породе. Выбирают источник первичного гамма-излучения с энергией чуть больше E_K серебра. Исследуемый образец размещают в зонде, и если в нем есть серебро, то в спектре обязательно будет наблюдаться пик характеристического излучения серебра.

Найдя положение пика в спектре по энергетической градуировке, определяем энергию. Если найденное значение энергии совпадает с энергией характеристического излучения серебра, то делается вывод о наличии в исследуемой породе серебра.

Наиболее актуальной задачей является количественный анализ (определение концентрации элемента в сложной среде). С этой целью выполняют **эталонирование**, являющееся наиболее ответственным этапом, от качества и правильности которого зависит точность количественного анализа.

Суть эталонирования состоит в построении зависимости между аналитическим параметром метода и содержанием определяемого элемента в среде.

В качестве аналитического параметра могут быть в зависимости от модификации метода либо интенсивность характеристического излучения элемента, измеренная в определенном энергетическом интервале спектра (модификация спектральной интенсивности), либо величина отношения интенсивности характеристического излучения элемента к интенсивности рассеянного гамма-излучения (модификация спектральных отношений), либо разность определенных величин (модификация спектральной разности).

Выбор аппаратурно-методических параметров РРМ осуществляют на основе оптимизационной модели, связывающей оптимальную ширину окна в области аналитической линии в зависимости от энергетического разрешения детектора, соотношения энергий рассеянного и флуоресцентного излучений и их интенсивностей.

Лабораторный вариант эталонирования предусматривает наличие не менее 30 представительных проб исследуемого материала с известным содержанием определяемого элемента. Последовательно измеряя эти эталонные пробы находят значения аналитического параметра.

Зависимость аналитического параметра от концентрации определяемого элемента служит эталонировочным графиком – основой для определения элемента в неизвестных пробах. В процессе эталонирования аппаратуры время измерения интенсивности излучения выбирают с точки зрения обеспечения минимальной статистической погрешности.

Такая зависимость используется в дальнейшем при интерпретации результатов (определения содержания элемента).

Эталонирование аппаратуры при рентгенорадиометрическом каротаже выполняют следующим образом. Выбирают скважины, пересекающие наиболее типичные рудные зоны и тела, тщательно опробованные по керну.

Сопоставлением данных РРК и результатов керна строят эталонировочную зависимость, которая автоматически учитывает влияние текстурно-структурных особенностей руд данного месторождения на результаты рентгенорадиометрического опробования и используется в дальнейшем для количественной интерпретации.

В процессе работы градуировочный график может меняться за счет различных причин: распад источника, его замена, замена отдельных узлов и деталей электронной аппаратуры, старение и замена детектора и т.д.

Практика рентгенорадиометрического метода в геолого-геофизических исследованиях

Рентгенорадиометрический метод нашел очень широкое применение на всех этапах геологоразведочных работ. Высокая эффективность этого метода объясняется прежде всего возможностью экспрессного определения содержания рудных элементов в различных условиях: в горных выработках, на поверхности, в скважинах, дробленных материалах и др.

Метод характеризуется многоплановостью решаемых геологических задач: от выявления оруденения на этапе поисков до количественных оценок характера оруденения.

В отличие от других ядерно-геофизических методов рентгенорадиометрический метод отличается высокой производительностью, универсальностью и простотой в реализации.

Использование рентгенорадиометрической съемки по рыхлым отложениям и опробование в коренных породах обеспечивает более высокую экспрессность определений по сравнению с традиционными геологическими и геохимическими методами.

На стадии поисково-оценочных работ метод позволяет оперативно дать распределение различных элементов – индикаторов рудных месторождений, выделить перспективные участки.

На этапе разведочных работ метод используется широко для оценки запасов месторождения, уточнения положения, мощности и строения рудных тел и содержания полезных компонентов.

Значительный экономический эффект дает использование метода для оперативного опробования и управления качеством добываемых руд. Это повышает полноту отработки месторождения, снижает потери металлов и разубоживания, что в конечном счете способствует созданию передовых ресурсосберегающих технологий.

Руды черных металлов. К ним относят месторождения железа, марганца и хрома. Специфические особенности руд черных металлов определяются их вещественным составом и необходимостью определения элемента в присутствии элементов – примесей с соседними атомными номерами.

Кроме того, следует отметить что характеристическое излучение этих элементов относятся к длинноволновой (мягкой) части спектра, что усложняет задачу детектирования столь низкоэнергетического излучения, Поэтому к рудам черных металлов применяется в основном рентгенорадиометрический анализ порошковых проб.

Наиболее часто применяемыми источниками служат тритий-циркониевые мишени, кадмий-109, плутоний-238. Применение этих излучателей позволяет обеспечить достаточно высокую чувствительность метода в области высоких концентраций элементов. Детекторами служат пропорциональные счетчики.

Основная трудность при анализе руд черных металлов состоит в избирательной регистрации рентгеновской флуоресценции элементов с близкими атомными номерами, а следовательно и энергий их аналитических линий: Fe (~6,4 кэВ), Mn (~5,9 кэВ) и Cr (~5,4 кэВ).

Методика отдельного определения содержания железа и марганца основана на использовании селективного фильтра из хрома, энергия К-края поглощения которого заключена в интервале между энергиями К-линий характеристического излучений железа и марганца.

Методика реализована на основе рентгеновского анализатора РРК-103 с источником плутоний-238 и стабилизации спектрометрических параметров аппаратуры с помощью реперного источника. Отдельное определение концентраций железа и марганца проведено путем измерений интенсивностей флуоресцентного излучений с фильтром (N') и без фильтра (N) в энергетическом интервале 4,6-7,4 кэВ.

Уголь. Ископаемые угли как объект ядерно-физического анализа представляют собой квазибинарную органической и минеральной составляющих.

Основная масса органической части представлена углеродом, а минеральная масса углей преимущественно состоит из алюмосиликатов, соединений кальция, железа и серы.

Последние три элемента представляют интерес с точки зрения рентгенорадиометрического анализа. Трудности рентгенорадиометрического анализа легких элементов (сера, кальций) заключаются в низкой эффективности регистрации низкоэнергетического флуоресцентного излучения серы (2,2 кэВ) и кальция (3,7 кэВ) и невысоком энергетическом разрешении спектрометров с пропорциональными детекторами.

Наиболее оптимальным источником первичного гамма-излучения служит железо-55 (~5,9 кэВ).

Различные модификации РРМ нашли широкое применение для экспресс-контроля качества твердого топлива, в частности определения зольности.

Карбонатные породы. Типичными представителями карбонатных пород являются известняки и доломиты. Актуальной задачей является отдельное определение содержания Fe и оксида Ca .

Необходимым условием одновременного определения этих двух компонентов единым приборным измерением служит превышение энергии первичного гамма-излучения над энергиями K -краев поглощения Fe и Ca и возможность избирательной регистрации K -серий рентгеновского флуоресцентного излучения определяемых элементов с помощью гамма – спектрометра.

При выборе энергии первичного излучения следует руководствоваться требованием получения максимальной чувствительности метода к определяемым компонентам. С этой точки зрения оптимальный диапазон энергии лежит в интервале 10-20 кэВ.

Вольфрамо-молибденовые месторождения. Вольфрамо-молибденовые, так же как и оловорудные месторождения стали традиционными объектами для рентгенорадиометрического опробования.

Определение концентрации этих элементов осуществлялось по K-серии характеристического рентгеновского излучения, причем для оценки вольфрама использовались пики вылета ксенонового пропорционального детектора от K-серии вольфрама. Энергия пиков вылета составила 29,5 кэВ.

При определении концентрации вольфрама и молибдена в условиях естественного залегания предпочтителен вариант спектральной разности, ввиду более низкого предела обнаружения этих элементов.

Известен успешный опыт применения рентгенорадиометрического метода при поиске и разведке месторождений на предмет определения свинца, олова, золота, сурьмы, ртути и других элементов (анализ проб, опробование руд в естественном залегании, каротажные исследования), а также в процессе добычи и переработки руд (опробование в выработках, навалах, транспортных потоках).

Контрольные вопросы

1. Сущность рентгенорадиометрического метода, решаемые задачи.
2. Аргументируйте основные достоинства рентгенорадиометрического метода в сравнении с традиционными химическими методами анализа.
3. Обоснуйте возможности реализации РРМ по К- и L-сериям характеристического рентгеновского излучения элементов.
4. Требования к выбору оптимальной энергии первичного гамма-излучения и детектора вторичного излучения с конечным энергетическим разрешением.
5. Укажите принципиальные особенности зондовых устройств РРМ исходя из их целевой предназначенности.
6. Принцип действия селективного фильтра как способа повышения избирательности рентгенорадиометрического метода анализа сложных веществ.
7. Принцип действия дифференциальных фильтров как гамма-спектрометра с почти идеальным энергетическим разрешением детектора.

Контрольные вопросы

8. Физическая сущность способа спектральной интенсивности. Его применимость в условиях матричного эффекта.
9. Обоснуйте достоинства способа спектральных отношений в сравнении со способом спектральной интенсивности.
10. Понятие геометрическая инверсия в РРМ и особенности зондовых устройств, использующих это явление.
11. Обоснуйте оптимальных параметров спектрометра с точки зрения минимизации статистической погрешности.
12. Как экспериментально оценить чувствительность РРМ.
13. На основе взаимосвязи интенсивности рентгеновской флуоресценции элемента с ядерно-физическими параметрами сложной среды объясните влияние матричного эффекта на показания метода.
14. В чем суть и назначение энергетической градуировки рентгенорадиометрической аппаратуры?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Каким способом можно осуществлять качественный анализ сложных руд с помощью энергетической градуировки?
2. Суть и назначение эталонирования аппаратуры.
3. Особенности построения эталонировочных зависимостей при реализации РРМ в лабораторном варианте и условиях естественного залегания.
4. Укажите принципиальные особенности реализации РРМ применительно к исследованию различных полезных ископаемых.

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!