

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

Лекция

Физические основы нейтронного гамма метода

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



План лекции:

1. Физические предпосылки НГМ.
2. Возможности метода для элементного анализа горных пород.
3. Применение НГК для оценки пористости пород и их насыщенности.
4. Применение НГК на рудных месторождениях.



Физические предпосылки НГМ

НГМ основан на облучении горной породы потоком быстрых нейтронов и регистрации мгновенного гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых и радиационном захвате тепловых нейтронов.

В первом случае метод называют нейтронным гамма-методом неупругого рассеяния (НГМ-нр), во втором – нейтронным гамма-методом радиационного захвата (НГМ-рз). В настоящее время более широкое применение находит НГМ с регистрацией гамма-излучения, сопровождающего радиационный захват тепловых нейтронов. Регистрируемое в НГМ мгновенное гамма-излучение формируется в процессе пространственно-энергетического распределения полей нейтронов и гамма-квантов. В силу этого НГМ по своим возможностям и области применения близок к нейтрон-нейтронным методам.

Гамма-излучение, возникающее при поглощении тепловых нейтронов является достаточно высокоэнергетическим и, следовательно несет информацию об актах поглощения нейтронов на значительном расстоянии от источника.



Благодаря этому НГМ в сравнении с ННМ обладает большей глубиной исследований.

Различают два варианта НГМ: интегральный, в котором регистрируется суммарная интенсивность гамма-излучения, и спектрометрический, в котором измеряется спектр гамма-излучения или поток квантов в определенной энергетической области.

По этой причине спектрометрический вариант сложен в аппаратном отношении, но более информативен.

Спектрометрический НГМ решает более широкий круг вопросов по сравнению с интегральным вариантом.

Возможность использования НГК для выявления рудных объектов и количественного анализа горных пород определяется различиями рудных и породообразующих элементов в сечениях радиационного захвата тепловых нейтронов и энергиях мгновенного гамма-излучения.

Таблица – Сечения реакции (n, γ) на тепловых нейтронах и выход γ -квантов

Нуклид	Распростра- ненность, %	Сечение реак- ции (n, γ) σ	Энергия *наиболее ха- рактерных линий, МэВ
^1H	99,98	0,33	2,23 (100)
^{23}Na	100	0,5	6,4 (22)
			3,56 (18)
^{27}Al	100	0,23	7,72 (35)
			4,79 (9)
			3,02 (15)
^{28}Si	92,27	0,08	4,93 (60)
			3,54 (47)
			1,95 (29)
			1,17 (36)
			0,51 (26)
^{40}Ca	96,97	0,22	6,41 (22)
			4,42 (12)
			1,94 (39)
			0,34 (40)
^{55}Mn	100	13,2	7,26 (12)
			7,04 (9)
			5,03 (9)
^{56}Fe	91,68	2,7	7,64 (32)
			6,03 (8)
			5,92 (9)

* В скобках указан выход γ -квантов в процентах на распад; $1\sigma=10^{-24}\text{ см}^2$.



Элементный анализ вещества по γ -излучению радиационного захвата нейтронов определяются как индивидуальным характером спектров γ -излучения изотопов, так и различными величинами сечений захвата тепловых нейтронов.

Из распространенных элементов крайне низкими сечениями захвата тепловых нейтронов ($\sigma < 0,01$ барн) обладают углерод, кислород и фтор. Изотопы с повышенными сечениями захвата можно с позиций НГМ разделить на три группы.

К первой группе относятся изотопы, имеющие интенсивные γ -линии в жесткой части спектра ($E > 6-7$ МэВ). Это Cl, Al, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu и др. Изотопы первой группы сравнительно легко выделить в среде сложного состава благодаря простому строению спектра в его жесткой части.

Ко второй группе относятся изотопы, имеющие интенсивные γ -линии в средней части спектра (3-6 МэВ). Типичными представителями этой группы являются Ca и Si.

Большинство изотопов составляют третью группу, для которой характерно наличие в спектре γ -излучения радиационного захвата интенсивных линий в относительно мягкой области ($E < 2 \div 3$ МэВ). Типичным представителем третьей группы является водород.



Различные элементы обладают различными макроскопическими сечениями радиационного захвата. Возбужденные ядра, как правило, испускают сложный (немоноэнергетический) спектр гамма-излучения.

Для среды сложного состава поток γ -квантов, испускаемых определяемым элементом A при захвате нейтронов, можно оценить приближенно из формулы:

$$N_{\gamma} = k \cdot Q \frac{m_A \cdot \Sigma_{n\gamma}(A)}{\sum_{i=1}^n m_i \Sigma_{n\gamma}(i) \cdot F(\rho, \tau)},$$

где k – постоянный множитель;

Q – мощность нейтронного источника;

m_A, m_i – соответственно концентрация элемента A и i -го элемента в среде;

$\Sigma_{n\gamma}(A), \Sigma_{n\gamma}(i)$ – соответственно макроскопическое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов элементом A и i -м элементом в среде;

$F(\rho, \tau)$ – функция ослабления гамма-квантов, зависящая от плотности ρ среды и массового коэффициента ослабления τ гамма-квантов.



Из формулы следует, что интенсивность мгновенного гамма-излучения, испускаемого при захвате тепловых нейтронов определяемым элементом, пропорциональна сечению захвата и концентрации элемента A в среде и обратно пропорциональна функции ослабления гамма-квантов.

Возможности метода для элементного анализа горных пород

Элементный анализ пород и руд с помощью нейтронного гамма-метода целесообразно проводить на элементы, обладающие сравнительно большим сечением радиационного захвата тепловых нейтронов. Благоприятным моментом также является отсутствие в среде сопутствующих элементов, испускающих при захвате тепловых нейтронов гамма-кванты с энергиями, близкими к аналитической гамма-линии определяемого элемента.

Реализация НГМ обычно осуществляется гамма-спектрометром на основе сцинтилляционного детектора, обладающего конечным энергетическим разрешением.



Аппаратурные спектры нейтронного гамма-излучения очень сложны. Это объясняется невысоким энергетическим разрешением сцинтилляционного детектора, наложением рассеянного гамма-излучения и сложным спектром первичного гамма-излучения, испускаемого при радиационном захвате.

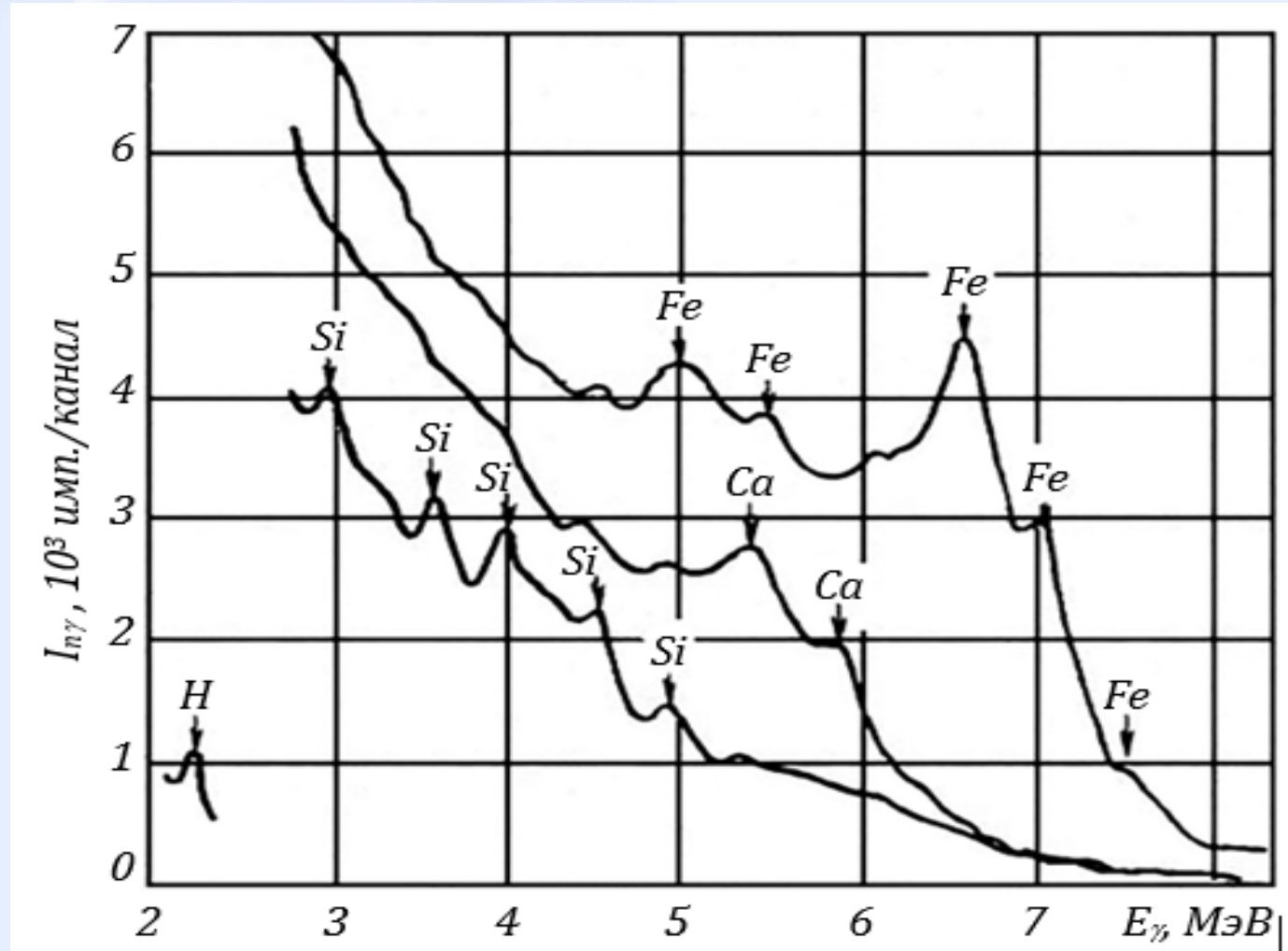
Поэтому отдельные, наиболее интенсивные γ -линии выделяются на фоне непрерывного комптоновского распределения более высокоэнергетического γ -излучения.

Природа образования дополнительных пиков связана с выходом из детектора одного аннигиляционного гамма-кванта ($E_0=0,511$ МэВ)-полупарный пик, двух аннигиляционных гамма-квантов ($E_0=1,022$ МэВ)-парный пик. Аннигиляционные гамма-кванты возникают за счет образования электронно-позитронных пар.

Поток γ -квантов, испускаемых при радиационном захвате тепловых нейтронов, зависит от концентрации определяемого элемента, его макроскопического сечения, элементного состава вмещающей среды и гамма-поглощающих свойств среды.

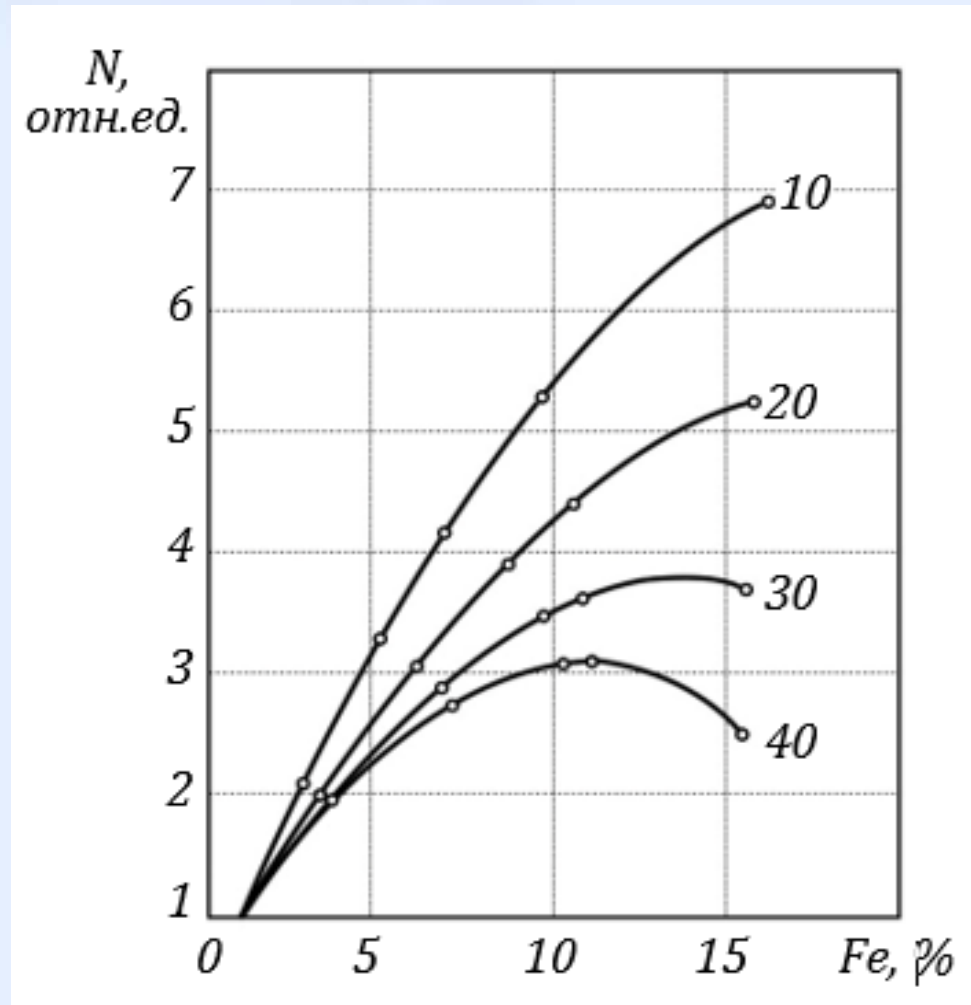


Спектры гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов для железной руды (Fe), известняка (Ca) и кварцевого песка (Si)





Экспериментальные зависимости интенсивности гамма-излучения с энергией $>6,6$ МэВ от содержания железа. Шифр кривых – длина зонда, см





Основными мешающими факторами при количественном определении содержания Fe в рудах могут быть Mn, Al и переменная влажность. Mn обладает высоким сечением захвата тепловых нейтронов (13,2 барн) и испускает жесткое гамма-излучение с энергией, близкой к аналитической линии Fe (7,64 МэВ). Поэтому при совместном нахождении в рудах Fe и Mn необходимо учитывать влияние последнего, например путем нейтронной активации Mn. Влияние Al на результаты определения Fe значительно ниже, ввиду того, что сечение поглощения тепловых нейтронов у Al на порядок ниже чем у Fe.

Переменная влажность анализируемых руд меняет плотность потока тепловых нейтронов как за счет замедляющей способности водорода, так и его диффузионно-поглощающих свойств по отношению к тепловым нейтронам. Влияние этого фактора можно устранить путем применения метода спектральных отношений, основанного на регистрации вторичного гамма-излучения в двух энергетических интервалах спектра: один интервал в области аналитической линии Fe (~7,64 МэВ), другой – в области линии H (~2,23 МэВ).



Выбором оптимальной ширины энергетического окна можно добиться независимости величины отношения измеренных интенсивностей гамма-излучения от водородосодержания.

Известен опыт применения спектрометрического НГМ для определения концентрации Ni , сечение поглощения теплового нейтрона которого равно 4,6 барн. В качестве аналитической линии Ni выбрана гамма-линия радиационного захвата с энергией 9 МэВ. В никелевых рудах обычно сопутствующим элементом является Fe. Устранить мешающее влияние Fe на результаты определения Ni можно способом спектральных отношений с регистрацией гамма-излучения в двух областях спектра: 8,6-9 МэВ и 7,4-8,2 МэВ. Порог чувствительности определения Ni составил около 0,3%.

Возможность анализа углей по гамма-излучению радиационного захвата нейтронов определяются индивидуальным характером спектров гамма-излучения и различными значениями сечений захвата тепловых нейтронов ядрами элементов, слагающих органическую и минеральную части углей.



Анализ проб углей массой более 10 кг на зольность осуществлялся по интенсивности захватного гамма-излучения с энергией 5,0–7,8 МэВ. Эта энергетическая область обусловлена захватным гамма-излучением основных золообразующих элементов угля (Al, Si, S, Ca, Fe). Оптимальная толщина слоя определялась из условия максимальной независимости результатов измерений от влажности.

Мешающим фактором при определении зольности углей по данным спектрометрического НГМ является Fe, имеющее значительно большее сечение захвата тепловых нейтронов в сравнении с другими золообразующими элементами. Показана возможность определения Fe по величине спектрального отношения интенсивностей излучения в области аналитических линий Fe и H с последующей коррекцией результатов определения зольности.

Благоприятные нейтронно-радиационные характеристики для элементного анализа нейтронным гамма-методом имеют Cr, Hg, Cl, S, Cu, Pb и многие редкоземельные элементы.



Применение НГК для оценки пористости пород и их насыщенности

Интенсивность γ -излучения радиационного захвата тепловых нейтронов, также как показания ННМ определяется в первую очередь замедляющими и поглощающими свойствами горных пород. Влияние этих параметров на результаты НГК проявляются по разному в зависимости от размера зонда, энергетического состава возникающего γ -излучения и скважинных условий измерений.

В реальных скважинных условиях присутствие в горных породах аномальных поглотителей тепловых нейтронов оказывает на регистрируемую интенсивность захватного гамма-излучения различное воздействие в зависимости от энергетического состава вторичного излучения. Если при поглощении тепловых нейтронов испускается низкоэнергетическое гамма-излучение (менее $\sim 2,5$ МэВ), легко поглощаемое породой, буровым раствором, обсадной колонной, корпусом прибора и вследствие этого не достигающее детектора, то наличие в горной породе таких аномальных поглотителей приводит к снижению регистрируемой интенсивности.



Такая ситуация типична для бора, испускающего при захвате тепловых нейтронов мягкое гамма-излучение ($\sim 0,5$ МэВ), практически не достигающее до детектора. На кривых НГК бороносные пласты отмечаются пониженными значениями интенсивности.

Если в среде находится аномальный поглотитель тепловых нейтронов, например хлор Cl , испускающий γ -излучение с энергией $E=6,62$ МэВ, то при увеличении концентрации Cl интенсивность жесткого излучения возрастает.

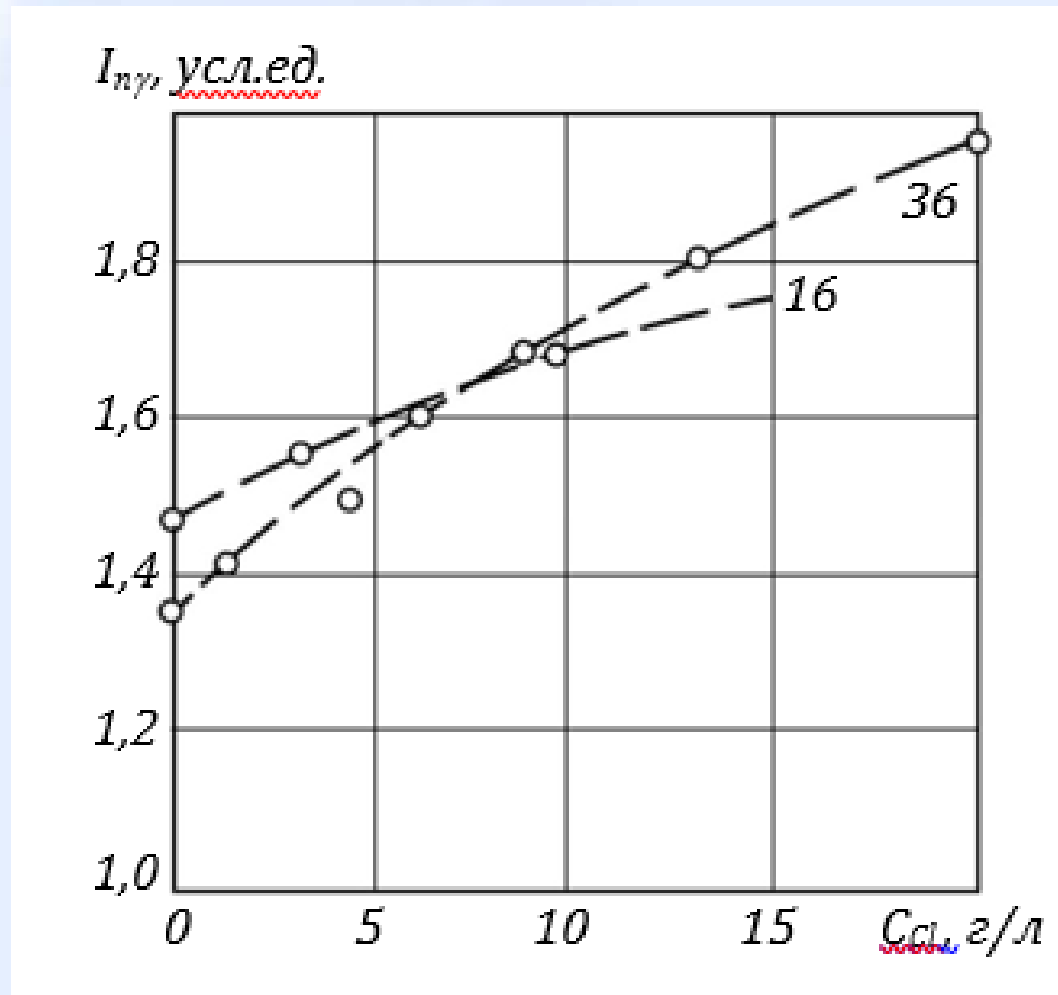
Следовательно, водоносный пласт, насыщенный Cl будет давать повышенное значение НГК по сравнению с нефтеносным.

Таким образом, если захват тепловых нейтронов ядрами аномальных поглотителей сопровождается жестким γ -излучением, то их присутствие и увеличение концентрации этих элементов приводит к увеличению интенсивности γ -излучения. К числу таких элементов относятся Cl , Mn , Cd , Li и др.

Результаты НГК зависят не только от Cl -содержания, но и от замедляющих свойств среды, т.е. от водородсодержания.



Зависимости $I_{ny} = f(C_{cl})$, полученные на модели песчаного пласта разной влажности (шифр кривых)





Из характера приведенных зависимостей можно сделать ряд выводов:

- 1) С увеличением Cl -содержания интенсивность γ -излучения возрастает, независимо от водородсодержания. При захвате тепловых нейтронов Cl испускает жесткое γ -излучение, чем больше содержание хлора, тем интенсивность излучения возрастает.
- 2) Кривые пересекаются, точка пересечения этих зависимостей свидетельствует о том, что при определенной минерализации (Cl -содержание) показания НГК не зависят от водородсодержания.
- 3) При низкой минерализации ($< 5\text{ г/л } Cl$) низкопористая среда (меньше водородсодержание) дает повышенную интенсивность γ -излучения, а высокопористая среда – пониженную интенсивность.

Это объясняется следующим: в среде с повышенным водородсодержанием больше водорода, большее число тепловых нейтронов поглощается ядрами водорода и меньшая часть – ядрами хлора. γ -излучение от водорода (2,23 МэВ) мягкое, оно поглощается и до детектора не доходит. Таким образом, интенсивность от исследуемой среды с большим водородсодержанием падает.



4) При высокой минерализации ($> 5 \text{ г/л Cl}$) наблюдается обратная картина: низкопористая среда выделяется минимальными показаниями, а высокопористая – максимальными.

Так как водород является замедлителем, то большая часть тепловых нейтронов будет в среде, где водорода много. Поэтому большая часть нейтронов будет поглощаться хлором, который дает повышенные показания НГК.

С увеличением Cl -содержания вод рассматриваемая связь меняется качественным образом.

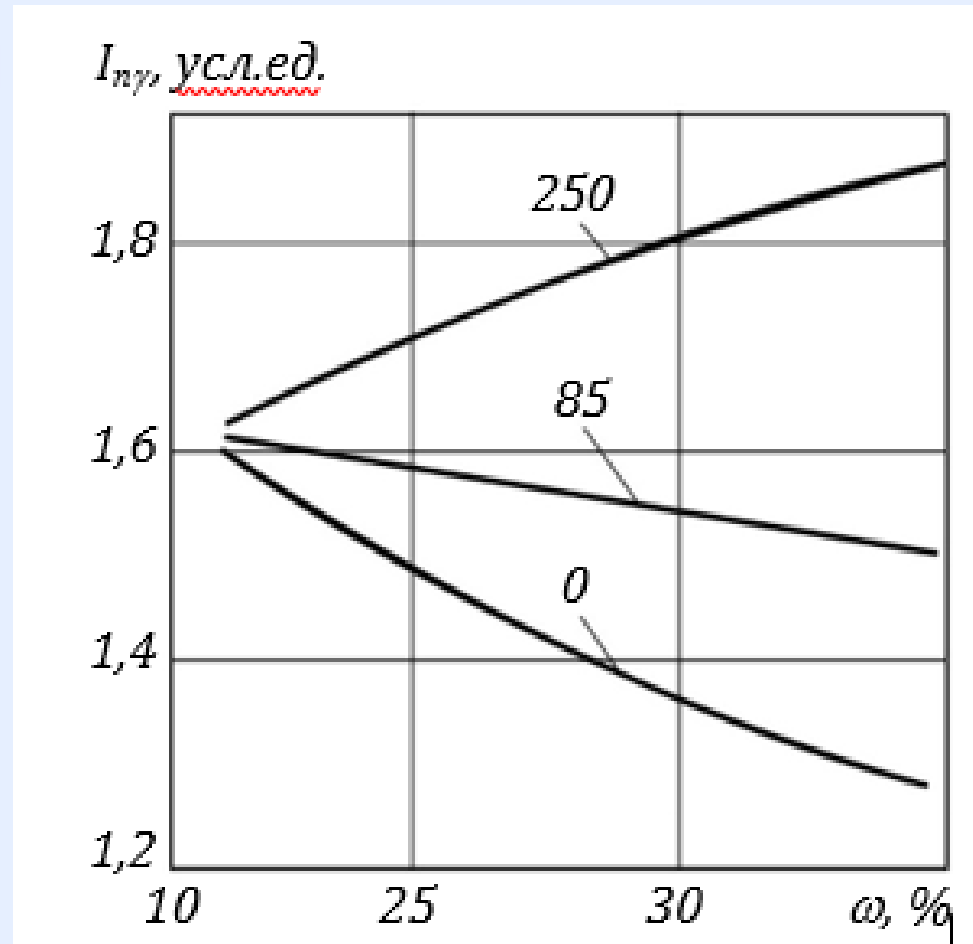
При повышенном Cl -содержании увеличение водородсодержания сопровождается закономерным увеличением интенсивности, а при слабой минерализации увеличении водорода приводит к уменьшению интенсивности захватного излучения.

Водородосодержание оказывает на показания НГК такое же влияние как и в методе ННК.



Связь $I_{ny} = f(\omega)$ в условиях повышенной минерализации пластовых вод по данным моделирования песчаного пласта.

Шифр кривых – минерализация воды в г/л по NaCl





При отсутствии аномальных поглотителей тепловых нейтронов (за исключением водорода) высокопористая среда дает повышенное показание НГК при малой длине зонда, а при больших длинах зонда – интенсивность в высокопористой среде падает.

На практике, как правило пользуются заинверсионными зондами (45-60см). В диапазоне инверсионных зондов НГК практически нечувствителен к вариациям водородсодержания. Снижение интенсивности γ -излучения от водородсодержания при большой длине зонда связано с преимущественным захватом тепловых нейтронов ядрами водорода.

Следовательно уменьшается и число актов захвата на элементах породы, что и приводит к уменьшению интенсивности захвата γ -излучения от породы.

Существенные затруднения возникают при использовании НГК для изучения песчано-глинистого разреза.

Повышенная γ -активность глин затрудняет определение коэффициента пористости.



Точность оценки пористости зависит от чувствительности метода к хлорсодержанию горных пород. Чувствительность может быть повышена при использовании спектрометрического варианта НГК, при комплексировании НГК и ННК-т, а также при использовании импульсных нейтронных методов.

Одной из важных задач в нефтяной геофизике является разделение коллекторов по их водонефтенасыщению. Используется связь между интенсивностью γ -излучения и минерализацией пластовых вод. Методика разделения коллекторов на водоносные и нефтеносные сводится к выбору оптимальных условий измерения, обеспечивающих максимальную чувствительность метода к Cl -содержанию и к учету искажающего влияния изменения H -содержания пород.

Максимальная чувствительность к Cl -содержанию достигается при использовании больших зондов (50-60 см) и избирательной регистрации жесткой составляющей γ -излучения. Наиболее эффективно разделение коллекторов на нефтеносные и водоносные осуществляется в случаях высокой минерализации (>250 г/л Cl) высокопористых терригенных породах.



Благодаря присутствию хлора в высокоминерализованной пластовой воде повышается интенсивность радиационного гамма-излучения $N_{n\gamma}$ и обогащается спектр гамма-излучений высокоэнергетическими компонентами (6,62 МэВ).

В результате показания НГК против водоносной части продуктивного пласта завышены по сравнению с показаниями против нефтеносной его части. Эту особенность кривой НГК используют для установления водонефтяного контакта (ВНК) и прослеживания его в процессе эксплуатации залежи нефти в однородных песчаных пластах, имеющих постоянный литологический состав и пористость, содержащих высокоминерализованную пластовую воду. Несмотря на то, что по данным НГК водоносные и нефтеносные пласты существенно различаются, их выделение затруднено влиянием скважинных условий.

Методика разделения коллекторов на водоносные и нефтеносные заключается в оптимизации условий измерений, обеспечивающих максимальную чувствительность метода к Cl -содержанию пород и учету искажающего действия изменения водородосодержания.



Наибольшее влияние на чувствительность НГК к Cl -содержанию оказывает наличие в скважине обсадных колонн и стального корпуса прибора. Это приводит к появлению фоновой составляющей γ -излучения, обусловленной радиационным захватом тепловых нейтронов ядрами Fe , Mn .

Они характеризуются повышенными сечениями захвата и дают жесткий спектр γ -излучения. Причем вклад этого фонового γ -излучения бывает соизмеримым с полезным сигналом, т.е с интенсивностью γ -излучения, приходящего из горной породы.

Исключить влияние стального корпуса прибора можно путем окружения корпуса слоем борсодержащего вещества. Бор экранирует стальной корпус от тепловых нейтронов и следовательно убирает составляющую $N_{n\gamma}(\text{Fe}, \text{Mn})$.

В качестве экрана выбран бор, ввиду того, что захватное γ -излучение бора (0,48 МэВ) практически полностью поглощается в гильзе прибора и не попадает в детектор.



Мешающее влияние обсадных колонн может исключаться путем добавки борсодержащего вещества (карбид бора) в цемент, заполняющий затрубное пространство скважины.

Добавление 1 % карбида бора повышает чувствительность метода к Cl -содержанию в 1,5 раза. При этом снижается также влияние не только обсадки, но и стального корпуса прибора.

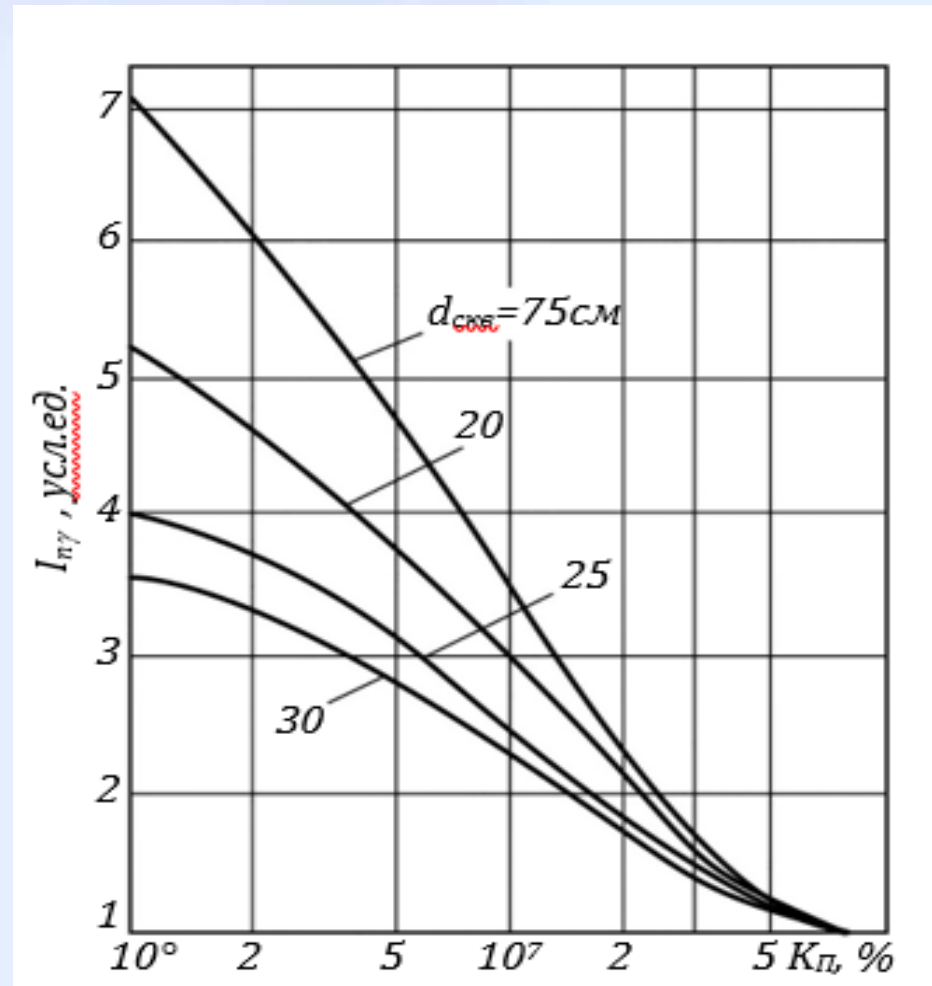
Увеличение диаметра скважины, заполненной водой, эквивалентно увеличению влажности среды и уменьшению ее плотности.

В условиях НГК преобладает первый эффект, поэтому для заинверсионных зондов интенсивность γ -излучения радиационного захвата уменьшается при увеличении диаметра скважины.

Увеличение концентрации $NaCl$ в буровом растворе приводит к росту интенсивности $N_{n\gamma}$, причем эффект тем больше, чем выше концентрация Cl , больше размер зонда и диаметр скважины.



Зависимость показаний НГК от коэффициента пористости
методами известняков для зонда длиной 60 см





Глубинность нейтронного гамма-метода определяется пространственным распределением тепловых нейтронов и гамма-ослабляющими характеристиками среды.

Для ННМ радиус зоны исследования будет меньше, хотя глубина проникновения нейтронов в породу примерно одинакова.

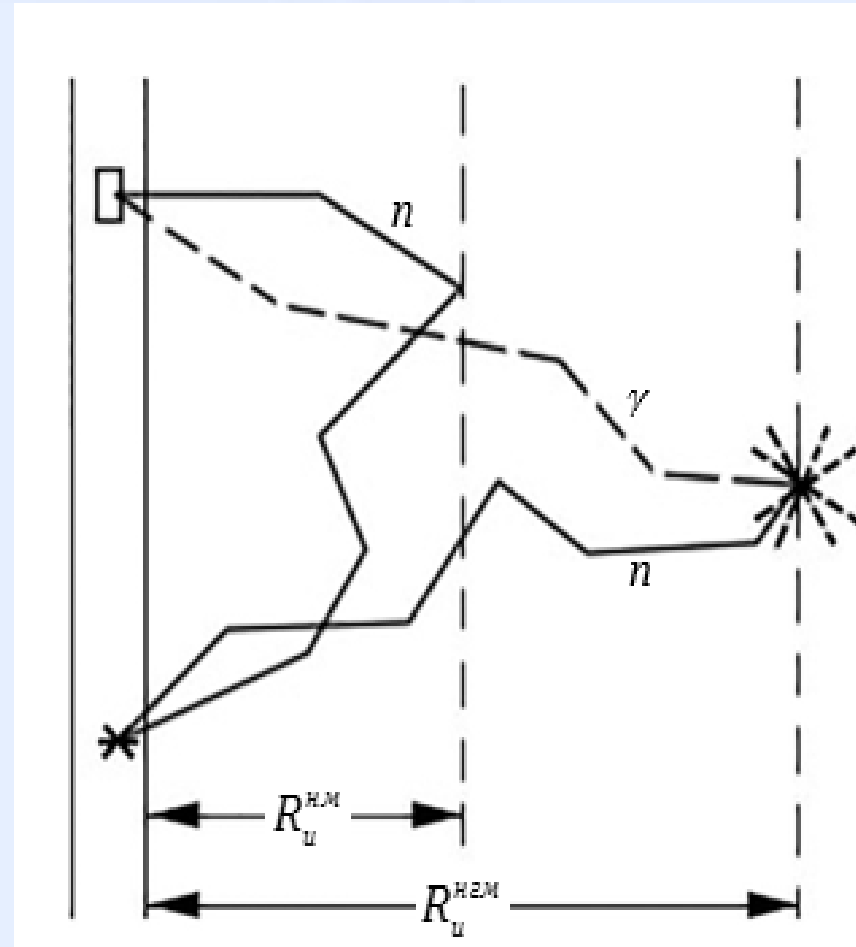
Вероятность попадания в детектор гамма-квантов, возникших в среде за счет поглощения тепловых нейтронов значительно выше вероятности попадания тепловых нейтронов.

Отсюда глубинность НГМ радиационного захвата тепловых нейтронов выше глубинности ННМ-т.

Глубинность НГК сложным образом зависит от размера зонда, водородосодержания пород и скважинных условий измерений.



К понятию радиуса исследований нейтронным и нейтронным гамма-гамма-методами





Для методов плотности тепловых и надтепловых нейтронов радиус зоны исследования будет значительно меньше, поскольку тепловые нейтроны в наиболее удаленных точках могут не дойти до детектора в силу радиационного захвата.

Спектрометрический нейтронный гамма-каротаж применим также для исследования газонасыщенности пластов.

Интенсивность жесткой части нейтронного гамма-спектра против газонасыщенных пластов больше, чем против водонасыщенных, вследствие большей плотности последних.

Увеличению контрастности метода способствует установка экранных фильтров, снижающих вклад фонового гамма-излучения от скважины.

Для оценки газонасыщенности пород с высокой переменной пористостью рекомендуется комплексировать НГК с данными ННК-т.

Применение НГК на рудных месторождениях

Энергетический состав гамма-излучения, испускаемого при радиационном захвате тепловых нейтронов ядрами элементов весьма разнообразен. Сложность энергетических спектров захватного гамма-излучения предопределили целесообразность применения спектрометрической модификации НГМ для исследования в рудной геофизике.

В практике спектрометрии захватного гамма-излучения используются лишь отдельные элементы с наиболее характерными спектрами и большими сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов.

В сложном аппаратурном спектре захватного γ -излучения горных пород, представляющем собой суперпозицию аппаратурных спектров многих породообразующих элементов, наиболее уверенно выделяются элементы испускающие интенсивные гамма-линии высоких энергий и обладающие высоким сечением захвата.



Вследствие этого спектрометрия γ -излучения радиационного захвата нейтронов наибольшее применение находит при исследовании рудных скважин, бурящихся с целью поисков и разведки железных, никелевых, титановых, марганцевых и других руд.

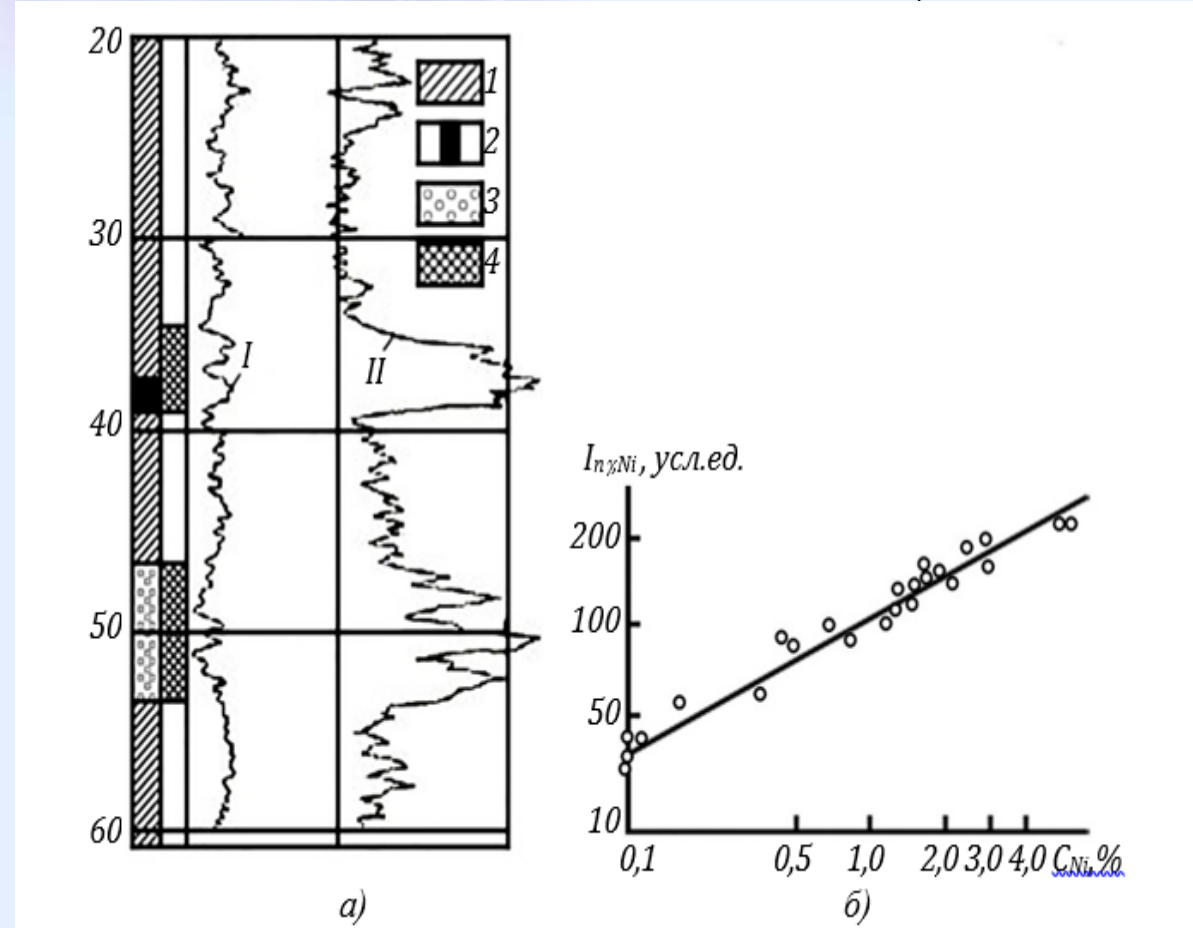
Как и для естественного γ -излучения, спектрометрические исследования γ -излучения радиационного захвата могут осуществляться двумя способами: снятием полных дифференциальных спектров в наиболее интересных интервалах разреза скважин и непрерывной регистрацией интенсивности в заданных энергетических диапазонах по всему разрезу.

В последнем случае выбираются интервалы энергий, в пределах которых основной вклад в регистрируемую интенсивность вносит искомый элемент.

При наличии в породе двух или нескольких элементов с близкими спектрами регистрируются две и более кривых в энергетических диапазонах, отвечающих наибольшему вкладу в регистрируемые интенсивности этих элементов.



Пример выделения никелевых руд (а) и зависимость $I_{n\gamma}$ от содержания никеля (C_{Ni}) в рудах (б).



I – кривая НГК; II – кривая $I_{n\gamma}$ при $E\gamma > 7,6$ МэВ.

1 – филлиты; 2 – массивная медно-никелевая руда; 3 – богатая вкрапленная руда; 4 – рудные интервалы по данным спектрометрии



Возможности спектрометрического метода выяснились на железорудных месторождениях. Железо, в сравнении с основными породообразующими элементами (Al, Si, Ca, Mg, S) обладает повышенным сечением радиационного захвата тепловых нейтронов.

Выбор энергетического интервала свыше 6,4 МэВ позволяет избавиться от гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов на С (4,43 МэВ) и О (6,1 МэВ). Показания спектрометрического НГК достаточно дифференцированы. При изменении содержания Fe на 1% показания меняются на 2,5% отн. Благоприятным элементом для постановки нейтронного гамма-метода является Ti. Месторождения Ti генетически связаны с магматическими, метаморфическими и осадочными комплексами. Наиболее известные минералы титана – рутил TiO_2 и ильменит $FeTiO_3$. Реакция радиационного захвата на Ti-48 приводит к возникновению наиболее интенсивной гамма-линии с энергией 6,75 МэВ. Массовое макроскопическое сечение захвата равно 0,073 см²/г.



Энергетический спектр титановой руды существенно отличается от спектра вмещающих пород в области 5,0-6,6 МэВ. В комплексных титано-железистых рудах необходимо учитывать влияние железа, искажающего жесткую часть спектра захватного гамма-излучения.

НГМ находит применение на месторождениях хромитовых руд. Его содержание в рудах может достигать до 40%. Природный Cr состоит из четырех стабильных изотопов.

Наибольший интерес представляют Cr-52 и Cr-53, имеющие сечение захвата тепловых нейтронов 0,73 и 17,5 барн и испускающие жесткие гамма-кванты с энергией 7,93 МэВ и 8,88 МэВ.

Для определения Cr в рудах рекомендован способ спектральных отношений. Величина отношения интенсивностей захватного гамма-излучения в энергетических интервалах 3-5 МэВ и 7-10 МэВ для богатых руд составила 1,58, для вмещающих пород – 7,43 и бедных руд – 2,17. Точность количественных определений 10-15% отн.



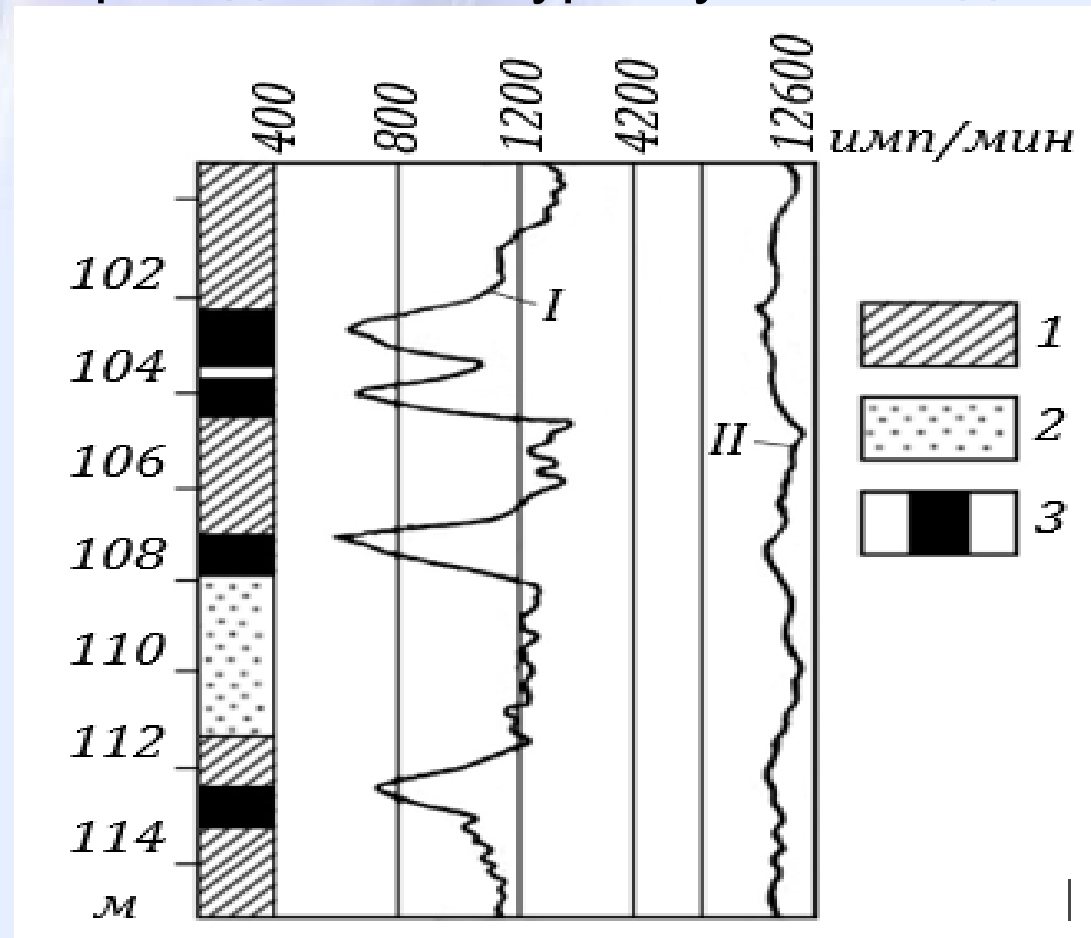
По спектрометрии нейтронного-гамма излучения можно четко выявлять в разрезе скважин пласты бурого угля с содержанием водорода 5-7%.

Вмещающие породы, как правило содержат породообразующие элементы, испускающие при поглощении тепловых нейтронов жесткое гамма-излучение. При использовании заинверсионного зонда (40 см) с Po-Be источником нейтронов угольные пласты отмечаются минимальными значениями интенсивности жесткой части спектра захватного гамма-излучения. Зольность углей определялась по отношению жесткой части спектра (более 3 МэВ) к мягкой (1,6-2,5 МэВ) составляющей, которое для углей в 2-3 раза ниже по сравнению с вмещающими породами. Такая нормировка показаний позволяет исключить влияние переменной влажности и скважинных условий измерений.

Известны примеры использования гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов для выделения борных пластов и соленосных толщ, выявления руд, содержащих медь, серу и др.



Пример выделения бурых углей по данным НГК



1 – глины, 2 – песчаник, 3 – уголь бурый

I – кривая при $E = 3-10$ МэВ; II – кривая при $E = 1,6-2,5$ МэВ



Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния является одной из модификаций нейтронного гамма-метода.

Основан на регистрации мгновенного гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах элементов.

По сравнению с НГМ-рз НГМ-нр находит ограниченное применение.

Это связано с относительно небольшим сечением неупругого рассеяния быстрых нейтронов у большинства элементов и сложностью вторичных гамма-спектров за счет возбуждения многих уровней.

Поэтому метод может найти применение в основном для анализа элементов первой четверти периодической системы Д. Менделеева:

углерод (4,43 МэВ), кислород (6,1 МэВ), алюминий (2,21 МэВ), кремний (1,78 МэВ) сера (~2,23 МэВ), кальций (3,74 МэВ), железо (0,84 МэВ) и др.



Помехой при количественном анализе железа может стать марганец, который в результате активации тепловыми нейтронами превращается в марганец-56 с периодом полураспада 2,5 час с испусканием гамма-квантов с энергией 0,845 МэВ.

Для исключения данной помехи необходимо уменьшать размеры анализируемой пробы и минимизировать вероятность замедления нейтронов.

Нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния нейтронов, реализованный с генератором нейтронов применялся для определения содержания углерода и кислорода в пробах углей массой 200-300 г.

Точность анализа составила (1-3)%. Объектом успешного применения неупругого рассеяния быстрых нейтронов для анализа легких сред является уголь.

Относительно большое сечение выхода гамма-квантов неупругого рассеяния у ядер углерода и различие в энергиях гамма-квантов, испускаемых возбужденными ядрами углерода и элементов минеральной части угля, делают возможным количественное определение содержания углерода в углях.



Комплексирование ННМ-нр и ННМ-рз позволяет успешно решать задачу контроля качества углей, в частности зольности.

Различие в энергии гамма-квантов, сопровождающих неупругое рассеяние быстрых нейтронов на ядрах углерод ($\sim 4,43$ МэВ) и радиационный захват тепловых нейтронов ядрами элементов минеральной части угля и обратная зависимость между содержаниями этих компонентов позволили использовать сигналы от углерода и минеральных примесей для оценки зольности углей.

В качестве аналитического параметра выбрано отношение интенсивности захватного гамма-излучения с энергией выше 5 МэВ к интенсивности гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах углерода с энергией 4,43 МэВ.

Оптимизированы условия измерений (расстояние источник-объект контроля, толщина пробы). Мешающими факторами являются переменная влажность и непостоянство содержания железа в углях. Предложены способы компенсации этих влияющих факторов.



В рассмотренных нейтронных методах используются стационарные источники нейтронов.

Развитие импульсной нейтронной техники, в частности импульсных генераторов нейтронов позволяет изучать нестационарные поля излучений, а именно пространственно-энергетическое и временное распределение полей нейтронов и гамма-квантов.

Появляется возможность отдельной регистрации гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых и радиационном захвате тепловых нейтронов.

Вопросы повышения эффективности нейтронных гамма-методов, реализуемых в импульсном режиме будут рассматриваться при реализации импульсных нейтронных методов.

Контрольные вопросы

1. Основные физические процессы взаимодействия нейтронов, положенные в основу нейтронного гамма-метода. Модификации НГМ.
2. Особенности интегрального и спектрометрического НГМ.
3. На чем основана возможность элементного анализа горных пород и руд по данным НГМ?
4. Назовите основные мешающие факторы при количественном анализе вещества с помощью НГМ-рз.
5. Физическая сущность способа спектральных отношений для исключения влияния переменной влажности пород.
6. Принципиальные особенности НГК при изучении пористости пород по водородосодержанию.
7. Принципиальные особенности НГК при изучении характера насыщения пор.
8. Понятия инверсионный, доинверсионный и заинверсионный зонды. Их характеристики и сфера применения.

Контрольные вопросы

9. Глубинность нейтронного гамма-метода. Параметры, влияющие на глубинность.
10. На чем основана возможность выделения угольных пластов по данным НГК?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Условие, при котором возможно возникновение гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов на ядрах элементов.
2. Укажите причины, ограничивающие применение стационарного НГМ-нр в практике элементного анализа горных пород.
3. Принципы разделения коллекторов по их водонефтенасыщенности в условиях различной минерализации пластовых вод.



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!