

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

## Лекция

# Физические основы фотонейтронного метода

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



## План лекции:

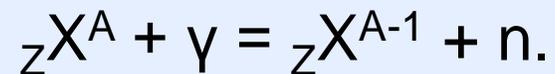
1. Физические предпосылки.
2. Фотонейтронный анализ бериллия в лабораторных условиях
3. Фотонейтронный каротаж на бериллий

Фотонейтронный метод (или гамма-нейтронный) принадлежит к числу первых ядерно-геофизических методов анализа вещественного состава горных пород. Метод предложен Г.В. Горшковым в 1937г.

Широкое развитие и применение гамма-нейтронного метода связано с разработкой его лабораторного и каротажного вариантов для исследования и анализа руд бериллия.

### Физические предпосылки

Фотонейтронный метод основан на использовании фотоядерной реакции



Механизм фотоядерной реакции состоит в поглощении гамма-кванта, переходе ядра в возбужденное состояние с последующим испусканием нейтрона.

## Фотонейтронные характеристики элементов

Ядро	$E_{\text{пор.}}, \text{МэВ}$	$\sigma_{\text{γн}}, 10^{-27} \text{см}^2$	Ядро	$E_{\text{пор.}}, \text{МэВ}$	$\sigma_{\text{γн}}, 10^{-27} \text{см}^2$
D	2,23	2,4	<sup>31</sup> P	12,0	16,7
<sup>9</sup> Be	1,67	3	<sup>40</sup> Ar	9,8	31
<sup>12</sup> C	18,7	8,6	<sup>63</sup> Cu	10,6	97
<sup>16</sup> O	15,6	7,7	<sup>109</sup> Ag	9,1	320
<sup>19</sup> F	10,4	11,5	<sup>197</sup> Au	7,9	460
<sup>23</sup> Na	12,0	13	<sup>209</sup> Bi	7,4	630
<sup>27</sup> Al	12,8	23	<sup>238</sup> U	6,0	980

Зависимости сечения фотоядерной реакции от энергии гамма-излучения имеет ярко выраженный резонансный характер.

Практическая реализация фотоядерной реакции возможна на базе радиоизотопных источников гамма-излучения. С помощью существующих импульсных изотопных источников возможна фотонейтронная реакция только на ядрах бериллия и дейтерия. Для фотонейтронного анализа на бериллий наиболее подходящим источником гамма-излучения является сурьма-124 ( $^{124}\text{Sb}$ ), испускающий гамма-кванты с энергией 1,69 МэВ. Данный источник возбуждает только ядра бериллия, что обеспечивает высокую селективность анализа и отсутствие влияния других фотоядерных реакций. Фотонейтроны, возникающие при облучении  $^9\text{Be}$  гамма-квантами, имеют энергию 24 кэВ.

В случае точечных источника и детектора, расположенных в безграничной среде, исходное дифференциальное уравнение для расчета потока фотонейтронов, образующихся в элементарном объеме  $dV$  среды и попадающих в детектор, имеет вид:

$$dN = n_A \cdot \sigma_{\gamma n} \cdot i \left( Q / 4\pi r_i^2 \right) \exp(-M \rho r_1) f_N(r_2) dV,$$

где  $n_A$  – число ядер анализируемого нуклида в  $1 \text{ см}^3$ ;

$\sigma_{\gamma n}$  – сечение фотоядерной реакции;

$i$  – выход фотонейтронов;

$Q$  – мощность источника гамма-квантов;

$r_i$  – расстояние от источника гамма-квантов до элементарного объема  $dV$ ;

$M$  – массовый коэффициент ослабления гамма-квантов;

$\rho$  – плотность среды;

$f_N(r_2)$  – функция, описывающая поток нейтронов от источника фотонейтронов – элементарного объема  $dV$ ;

$r_2$  – расстояние от объема  $dV$  до детектора нейтронов.

Таким образом, поле фотонейтронов является функцией гамма-квантовых и нейтронных свойств горных пород, а поток фотонейтронов прямо пропорционален содержанию бериллия в горной породе.

## **Фотонейтронный анализ бериллия в лабораторных условиях**

Бериллий является моноизотопным. В природных соединениях содержатся только ядра  $^9\text{Be}$ .

Бериллий относится к наиболее дефицитным элементам. При содержании бериллия, равном несколько сотых долей процента, месторождения могут считаться промышленными.

Концентрация бериллия преимущественно связана с поздними стадиями магматической дифференциации. Высокие содержания этого элемента характерны для месторождений пегматитового типа.

Природные концентрации бериллия обычно сопровождаются повышенными содержаниями ряда редких элементов. Для пегматитов характерна ассоциация Be с Li, Rb, Cs, Nb, Ta, Sc, U, Th, Zr, Hf, редкоземельными элементами.

Поэтому бериллиевые руды считаются ценным комплексным сырьем. По ореолам рассеяния бериллия могут обнаруживаться месторождения редких элементов, для которых бериллий является индикаторным элементом.

Для фотонейтронного анализа на бериллий используется реакция  ${}^9\text{Be} (\gamma, n) {}^8\text{Be}$ .

В результате фоторасщепления бериллия испускаются промежуточные нейтроны с энергией 24 кэВ. Количество образующихся фотонейтронов пропорционально содержанию бериллия в среде и мощности источника гамма-излучения. В этом заключаются физические основы фотонейтронного метода анализа.

Особенность гамма-нейтронного метода является необходимость регистрации относительно слабых потоков нейтронов в присутствии интенсивного гамма-излучения, рассеянного в исследуемой горной породе.

Это делает необходимым использование детекторов, обладающих высокой эффективностью к нейтронам и низкой чувствительностью к гамма-квантам.

Минимизация расстояния между источником и детектором ограничивается необходимостью экранирования детектора от воздействия прямого гамма-излучения источника. Оптимальная толщина защитного экрана из свинца составляет около 5 см.

Для детектирования нейтронов обычно используются счетчики, в которых происходит реакция  $B^{10} (n, \gamma) Li^7$ .

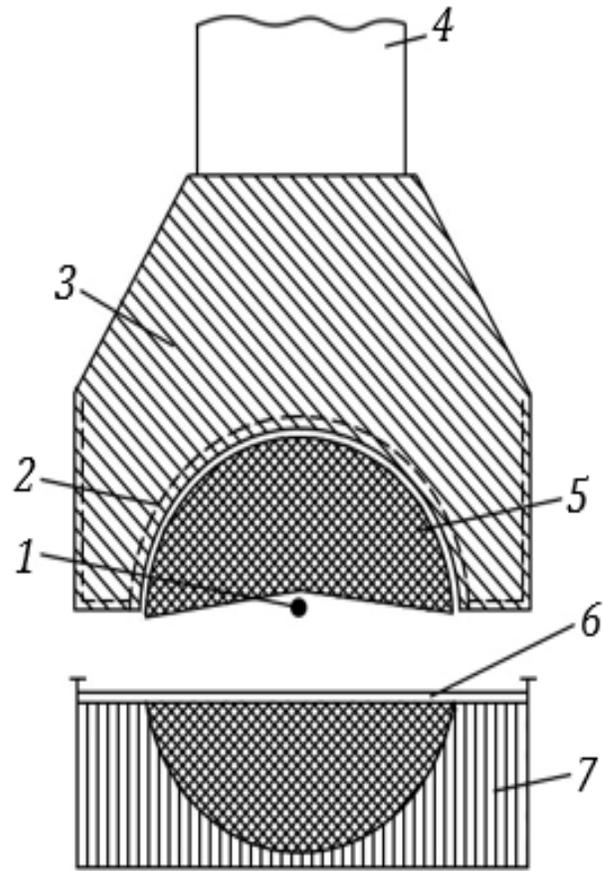
Газоразрядные счетчики наполнены газом  $BF_3$  или покрыты изнутри борсодержащим веществом.

Газ и твердое покрытие обогащаются изотопом  $B^{10}$ , имеющим аномально большое сечение поглощения нейтронов. Это повышает эффективность регистрации счетчика.

В полевой и каротажной фотонейтронной аппаратуре используются сцинтилляционные детекторы, выполненные на основе сернистого цинка и борной кислоты, обогащенной до 90% бором-10.



## Схема датчика бериллометра



- 1 – источник гамма-излучения; 2 – сцинтиллятор;  
3 – плексиглазовый вкладыш детектора; 4 – ФЭУ;  
5 – свинцовый экран; 6 – эталон окиси бериллия; 7 – парафин

Для получения максимальной чувствительности и точности анализа необходимы компактные датчики, в которых детектор должен быть максимально приближен к источнику и опробуемой поверхности среды.

В этом плане удачной является конструкция, в которой детектор имеет форму цилиндра с вогнутым дном.

Для систематического контроля аппаратуры в бериллометрах обычно используют портативные рабочие эталоны, совмещая их с защитным экраном.

Методика количественного анализа бериллия в пробах гамма-нейтронным методом основана на сравнении показаний метода от исследуемой и эталонной проб.

Эталонные пробы выбирают из наиболее типичных разновидностей бериллиевых руд месторождения. Иногда эталоны готовят из искусственных смесей с известным содержанием бериллия.

Определение содержания бериллия в рудах осуществляется сопоставлением показаний от эталонных проб по формуле:

$$m = m_{\text{ЭТ}} \frac{N - N_{\Phi}}{N_{\text{ЭТ}} - N_{\Phi}} \cdot \frac{P_{\text{ЭТ}}}{P},$$

где  $m$ ,  $P$  и  $N$  – соответственно содержание бериллия, масса и скорость счета импульсов исследуемой пробы;

$m_{\text{ЭТ}}$ ,  $P_{\text{ЭТ}}$  и  $N_{\text{ЭТ}}$  – то же для эталонной пробы;

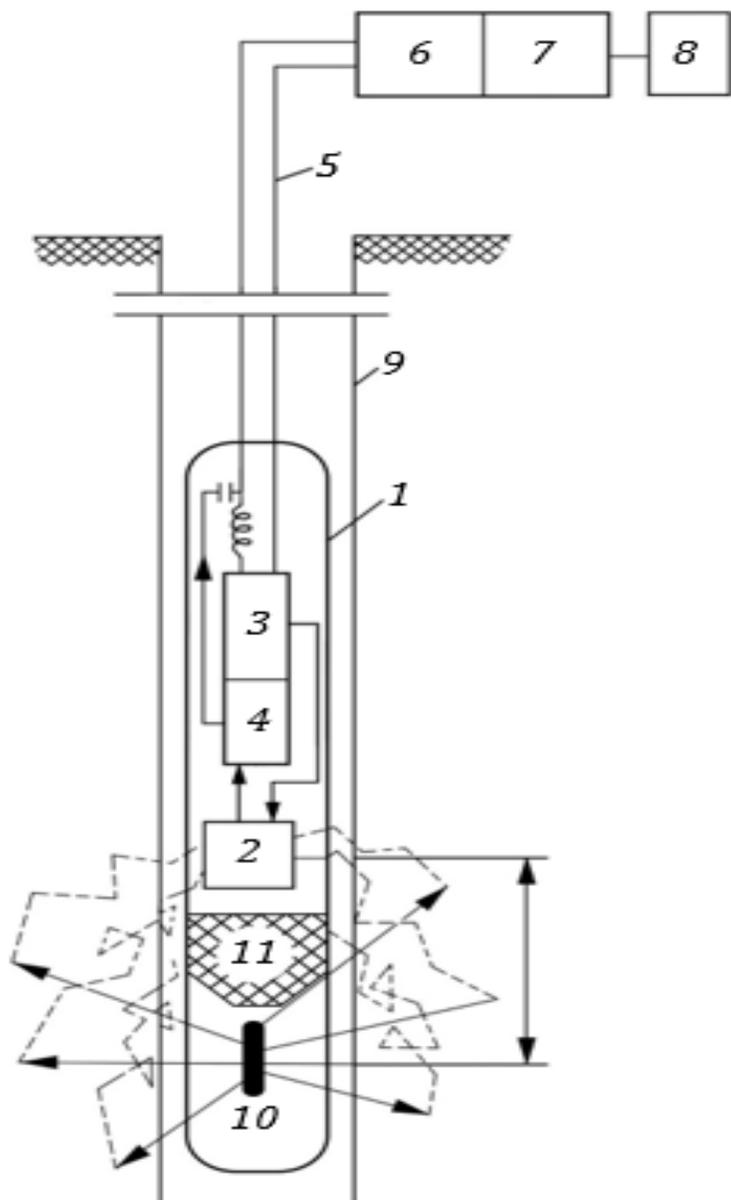
$N_{\Phi}$  – скорость счета импульсов фона.

В целом следует учитывать, что результаты гамма-нейтронных измерений зависят от гамма-лучевых свойств (вещественный состав, плотность) и нейтронно-замедляющих и поглощающих свойств (влажность, плотность, наличие замедлителей и поглотителей).

Суммарная погрешность фотонейтронного анализа проб может достигать 10% отн.



## Схема проведения ГНК



- 1 – скважинный прибор;
- 2 – детектор;
- 3 – высоковольтный источник питания детектора;
- 4 – усилитель;
- 5 – кабель;
- 6 – амплитудный анализатор импульсов;
- 7 – измеритель скорости счета импульсов;
- 8 – регистрирующий прибор;
- 9 – скважина;
- 10 – радиоизотопный источник  $\gamma$ -лучей;
- 11 – экран

Задача учета  $\gamma$ -лучевых свойств упрощается тем, что для  $\gamma$ -квантов источника  $^{124}\text{Sb}$  с энергией 1,69 МэВ вероятность фотоэффекта ничтожно мала и взаимодействие их с электронными оболочками атомов определяется только комптон-эффектом.

Поэтому интенсивность жестких  $\gamma$ -лучей и поток генерируемых ими фотонейтронов зависят от  $\rho$  исследуемой среды и не зависят от ее  $Z_{эф}$ .

Зависимость показаний ГНК от плотности  $\rho$ , так же как и в гамма-гамма каротаже, носит инверсионный характер. Однако использовать явление инверсии для исключения изменений плотности в ГНК не удастся, поскольку длина инверсионного зонда для  $\gamma$ -квантов источника  $^{124}\text{Sb}$  примерно вдвое больше длины зонда, оптимального по чувствительности.

Наибольшей чувствительностью отличаются зонды ГНК, которые являются «доинверсионными» по влажности, т.е. показания их с увеличением последней возрастают. Инверсия по влажности в ГНК имеет аппаратное происхождение и связана с относительно небольшой эффективностью применяемых детекторов к тепловым нейтронам.

На показания гамма-нейтронного каротажа кроме концентрации  $V_e$  влияют нейтронные свойства горной породы.

Фотонейтроны образуются на незначительном расстоянии от детектора. На пути к детектору они не успевают полностью замедлиться до тепловых. Поэтому влияние влажности и нейтроннопоглощающих свойств среды в ГНК сказываются примерно так же, как в ННК.

Основными элементами – поглотителями тепловых нейтронов, вносящими помехи в результаты определения бериллия являются редкоземельные элементы, бор, кадмий, литий и др.

Их вклад можно оценить по содержанию, эквивалентному уменьшению показаний ГНК по бериллию на 1%. Эквивалентные концентрации составили для бора 0,03%, для кадмия – 0,075%, для хлора – 2,36%, для марганца – 9,4%.

При обычно применяемых зондах увеличение плотности пород увеличивает показания ГНМ, а влияние водородсодержания различно в зависимости от размера зонда и диаметра скважины.

Присутствие в породе элементов с высоким сечением поглощения нейтронов во всех случаях уменьшает показания ГНМ. Увеличение диаметра скважины уменьшает показания как в пустой, так и заполненной скважине. При малой влажности преобладает вклад надтепловых нейтронов и показания ГНК невелики.

С увеличением водородосодержания все более интенсивно происходит термализация фотонейтронов и показания увеличиваются.

При высокой влажности большинство фотонейтронов успевают замедлиться до тепловых и проявляется уменьшение плотности потока тепловых нейтронов с возрастанием водородосодержания.

При наличии слоя воды или бурового раствора между скважинным снарядами и породой поток  $\gamma$ -квантов, попадающих в породу снижается.

Кроме того при рассеянии снижается энергия, что делает невозможным реакцию  $(\gamma, n)$  – порог 1,67 МэВ.

Таким образом, наличие слоя воды должно приводить к снижению числа фотонейтронов. Однако, заметного снижения может не произойти. Вода, как известно, является наилучшим замедлителем.

Учитывая, что фотонейтроны имеют энергию около 24 кэВ, а счетчиком нейтронов служит детектор тепловых нейтронов, следует ожидать некоторого прироста числа тепловых нейтронов при наличии слоя воды.

Следовательно вода оказывает два противоположно направленных действия: увеличения числа фотонейтронов и уменьшение числа  $\gamma$ -квантов, вызывающих  $(\gamma, n)$  реакцию на  $Be$ .

При количественной интерпретации данных ГНК необходим контроль стабильности и работоспособности аппаратуры, выполняемый с помощью эталонировочного устройства.

Ежедневные измерения в эталонировочном устройстве нужны также для введения поправок на распад источника  $Sb^{124}$  ( $T_{1/2} = 0,16г$ ).

Результаты измерений должны быть привязаны к опорной скважине, для которой известен пересчетный коэффициент, который определяется дифференцированно на месторождении для конкретного типа руд и скважинных условий. Коэффициент находится путем сравнения результатов ГНК и опробования керна для определенной аппаратуры.

Ввиду того, что эталонировочное устройство не учитывает всех особенностей гамма-нейтронных полей в горной породе, то после изменения параметров зонда, следует осуществлять повторную привязку данных к опорной скважине.

Оценку глубинности ГНМ можно выполнить, используя аналогию с другими нейтронными методами. На основе принципа суперпозиции пространственных характеристик гамма и нейтронных полей глубинность ГНМ обычно принимают равной удвоенной длине миграции. В большинстве случаев глубинность варьирует в пределах от 5-20 см при средней плотности пород, близкой к  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Существенное влияние на радиус исследования оказывает влажность породы и наличие в ней поглотителей тепловых нейтронов.

Опыт применения ГНК на бериллий свидетельствует о трудности, связанной с обеспечением необходимой статистической точности и приемлемой скорости каротажа.

При аппаратурной чувствительности ГНК 10-20 имп./мин на 0,01% BeO поисковый каротаж проводят со скоростью 150-180 м/ч. Детальный каротаж рудных интервалов для количественной интерпретации результатов ГНК рекомендуется проводить со скоростью 25-30 м/ч.

С помощью аппаратуры ГНК-1 можно выделять руды с содержанием бериллия более 0,01%.

Погрешность определения бериллия не превышает 10-20% отн, что позволяет применять фотонейтронный каротаж при подсчете запасов бериллия.

По чувствительности, селективности и экспрессности фотонейтронный метод не имеет равных среди других инструментальных методов количественного определения бериллия как в лабораторных условиях, так и условиях естественного залегания.

## Контрольные вопросы

1. Суть фотоядерной реакции, положенной в основу гамма-нейтронного метода.
2. Какие требования предъявляются к детекторам, используемым в фотонейтронной аппаратуре для определения бериллия в рудах?
3. Аргументируйте доводы о том, что по чувствительности и избирательности гамма-нейтронный анализ на бериллий не имеет аналогов среди других методов определения бериллия.
4. Укажите основные факторы, влияющие на точность фотонейтронного метода анализа.
5. Какую роль в датчике бериллометра выполняют защитный экран из тяжелого элемента и парафиновый отражатель?
6. Каким образом можно повысить чувствительность фотонейтронного метода к бериллию?
7. Влияние скважинных условий на результаты фотонейтронного каротажа.

## **Вопросы для самостоятельного изучения**

1. Какую роль в процессе количественной интерпретации данных ГНК выполняют эталонировочные устройства и опорные скважины?
2. Требования к источникам гамма-излучения для практической реализации фотонейтронного анализа горных пород.
3. Глубинность фотонейтронного метода исследования горных пород. Основные факторы, влияющие на ее величину.

## 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!