

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

Лекция

Физические основы нейтронно-активационного метода

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



План лекции:

1. Общие сведения.
2. Физические предпосылки.
3. Оптимизация параметров.
4. Применение нейтронного активационного анализа в лабораторных условиях.
5. Нейтронный активационный каротаж

Общие сведения

В общем случае активационным методом называют способ определения элементного состава вещества, основанный на измерении активности искусственных радиоактивных нуклидов, образовавшихся в результате воздействия на исследуемое вещество ядерными излучениями.

В геолого-геофизических исследованиях наиболее широко используется НАМ, при котором исследуемое вещество облучается потоком нейтронов. При взаимодействии нейтронов на ядрах элементов происходят ядерные реакции, в результате которых образуются различные радиоактивные изотопы, распад которых сопровождается испусканием ядерных излучений.

Путем регистрации этих излучений решаются две основные задачи НАМ:

- идентификация радионуклидов, обуславливающих регистрируемую наведенную радиоактивность;
- определение концентрации активируемых изотопов и элементного состава исследуемого вещества.



Первая задача решается с учетом скорости распада образующихся радиоактивных изотопов, вида и энергии испускаемого при распаде излучений. Решение второй задачи основано на пропорциональности между величиной наведенной радиоактивности и числом ядер исходного элемента. В НАМ индикаторными признаками являются период полураспада изотопа и энергия испускаемого при его распаде гамма-излучения. По интенсивности наведенного гамма-излучения определяют концентрацию элемента.

Выделяют несколько направлений в применении НАМ.

Первое направление – лабораторный анализ проб и образцов.

Второе направление – выделение и изучение руд в условиях скважины (нейтронно – активационный каротаж НАК).

Изучение руд в естественном залегании – более сложная задача по сравнению с лабораторным анализом проб, поэтому возможности НАК как по числу анализируемых элементов, так и по точности значительно меньше возможностей лабораторного НАМ.

Физические предпосылки

В нейтронном активационном методе для возбуждения стабильных изотопов и получения радиоактивных ядер используют реакции под действием тепловых и быстрых нейтронов.

Активация ядер под действием тепловых нейтронов происходит как правило по реакции (n, γ) , а под действием быстрых нейтронов обычно в результате реакций (n, p) , (n, α) .

Из распространенных изотопов относительно большие микроскопические сечения активации имеют Mn^{55} , Cu^{63} , Na^{23} .

Однако активационный эффект определяется не только сечением, но и распространенностью изотопа и содержанием элемента в горной породе.

Так, значительный активационный эффект наблюдают при активации Al^{27} , Cl^{37} и некоторых других изотопов.

Нейтронно-активационные характеристики

| № | Реакция | Сечение активации, барн. | $T_{1/2}$ | E_{β} , мэВ | E_{γ} , мэВ |
|-----------------------|---|--------------------------|-----------|-------------------|--------------------|
| на тепловых нейтронах | | | | | |
| 1 | $\text{Na}^{23} (n, \gamma) \text{Na}^{24}$ | 0,54 | 14,9ч | 1,39 | 2,75 |
| 2 | $\text{Al}^{27} (n, \gamma) \text{Al}^{28}$ | 0,21 | 2,3 мин | 2,86 | 1,78 |
| 3 | $\text{Mn}^{55} (n, \gamma) \text{Mn}^{56}$ | 13,3 | 2,58ч | 2,86 | 0,84 |
| 4 | $\text{Cl}^{37} (n, \gamma) \text{Cl}^{38}$ | 0,56 | 37 мин | 4,8 | 2,15 1,6 |
| 5 | $\text{Cu}^{63} (n, \gamma) \text{Cu}^{64}$ | 4,5 | 12,9 ч | 0,573 | 0,511 |
| на быстрых нейтронах | | | | | |
| 6 | $\text{F}^{19} (n, \alpha) \text{N}^{16}$ | 0,15 | 7,3 сек | 10,23 | 6,1 |
| 7 | $\text{Si}^{28} (n, p) \text{Al}^{28}$ | 0,22 | 2,3 мин | 2,86 | 1,78 |
| 8 | $\text{O}^{16} (n, p) \text{N}^{16}$ | 0,05 | 7,3 сек | 10,23 | 6,1 |

Практическое значение той или иной ядерной реакции определяется в значительной степени свойствами активированного изотопа – его периодом полураспада, наличием или отсутствием удобных для регистрации излучений, отличием от других активированных изотопов, содержащихся в исследуемой руде.

Рассмотрим закономерность нарастания и спада наведенной активности, образовавшейся в результате облучения нейтронами ядер данного изотопа. В случае, когда при облучении пробы образуется один радиоактивный изотоп закон нарастания активности во времени в процессе облучения определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dN}{dt_a} = \Phi \sigma_a N_0 - \lambda N,$$

где Φ – плотность потока нейтронов;

σ_a – сечение активации (сечение ядерной реакции, приводящей к возникновению радионуклида);

N_0 – плотность ядер исходного элемента;

λ – постоянная распада радионуклида;

t_a – время активации (облучения).

Решая это дифференциальное уравнение в предположении постоянства величин σ_a и N_0 , имеем:

$$N(t_a) = \frac{\Phi \sigma_a N_0}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda t_a)].$$

Особенностью процесса активации является выполаживающий характер кривой нарастания числа радиоактивных ядер от времени активации, асимптотически стремящегося к значению $(\Phi \sigma_a N_0) / \lambda$.

Наведенная активность (число распадов в единицу времени) равна произведению λN . С учетом последнего закон изменений активности в процессе облучения запишется в виде:

$$A(t_a) = \Phi \sigma_a N_0 [1 - \exp(-\lambda t_a)].$$

Закон изменения активности от времени после окончания активации нетрудно записать:

$$A(t) = A(t_a) \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

где t – время, прошедшее после окончания активации.

Отсюда следует, что наведенная искусственным путем активность в любой момент времени пропорциональна содержанию исходного элемента (величина N_0 пропорциональна концентрации).

Рассмотренные уравнения активационного анализа будут справедливы в случае, когда продуктом распада радионуклида является стабильный нуклид. Если же в результате распада образуется другой радионуклид, то при выводе уравнения активации необходимо учитывать распад дочернего нуклида.

Из выражения (1) следует, что величина наведенной активности тем выше, чем больше сечение активации исходного элемента, его содержание и плотность потока первичного (нейтронного) излучения. Кроме того, на величину наведенной активности влияет время активации.

Оптимизация параметров

Общая схема активационного анализа состоит из следующих основных частей: активация, остывание (пауза), измерение наведенной активности.

Проведение активационного анализа связано с рациональным выбором времени облучения t_a и времени остывания t_o (от конца активации до момента измерения наведенной активности).

Время активации выбирают из расчета максимально возможного накопления анализируемого изотопа при достаточно низком уровне помех, а время остывания обычно выбирают с учетом периодов полураспада короткоживущих изотопов, мешающих анализу.

Конкретный выбор t_a и t_o зависит от условий проведения анализа, и в каждом случае – это особая, методическая задача.

Выбор оптимальных временных параметров нейтронно-активационного метода проводят из следующих соображений.

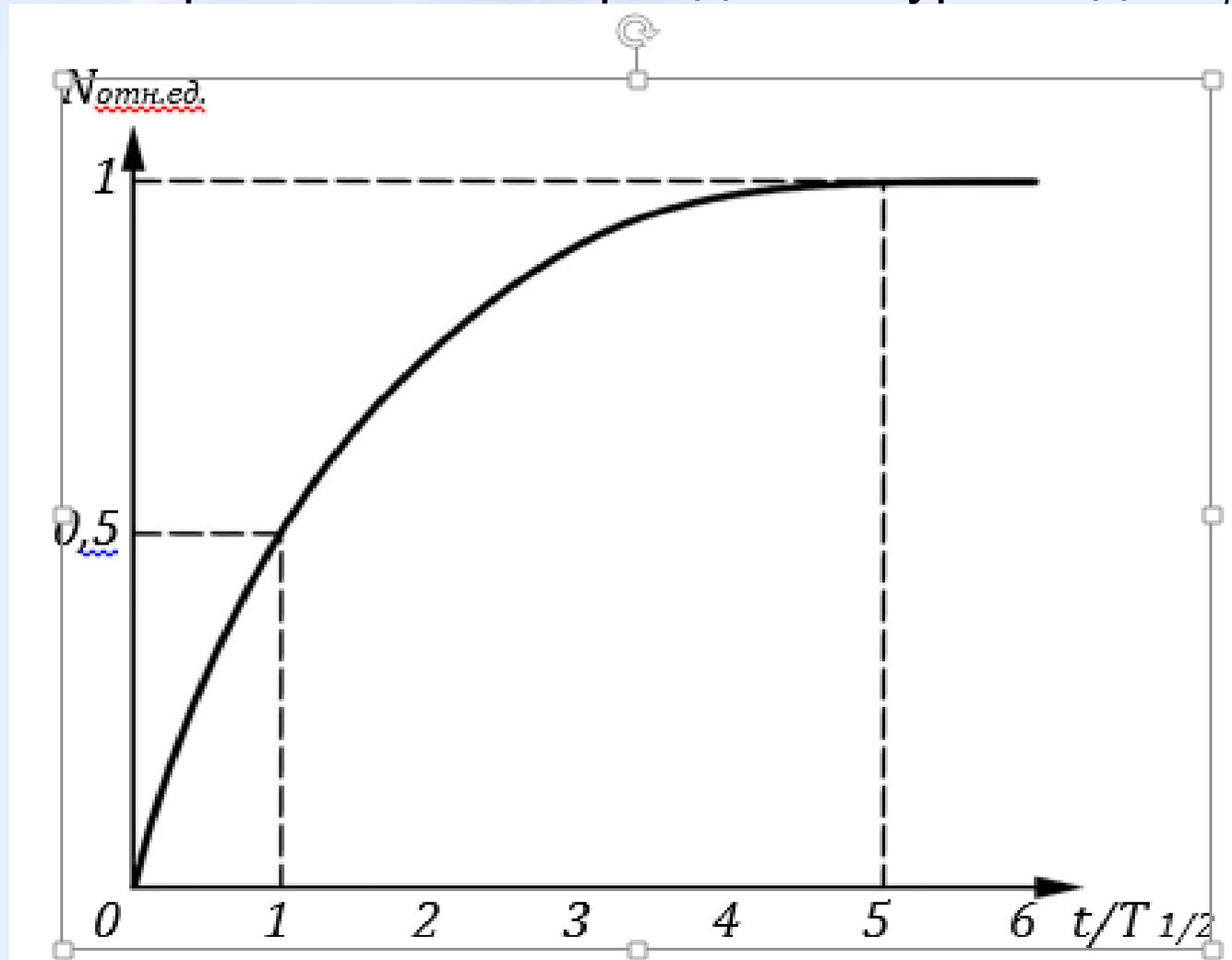
Пока время активации значительно меньше периода полураспада образующегося изотопа, наведенная активность растет практически пропорционально длительности активации.

С дальнейшим увеличением времени рост активности замедляется с переходом в область насыщения. Это объясняется конкурирующим действием двух процессов: накоплением радиоактивных ядер со временем и убылью радиоактивных ядер за счет распада.

При времени активации t_a , примерно равном $(5-6) T_{1/2}$, наступает насыщение. Отсюда следует, что выбор времени активации свыше $5T_{1/2}$ нерационален, т.к. наведенная активность при этом практически не возрастает.

Отсюда следует, что если в течение одного и того же времени облучать породы, радиоактивные изотопы которых характеризуются резко различными периодами полураспада $T_{1/2}$, то их наведенная радиоактивность будет существенно отличаться от максимальной величины.

Зависимость относительной наведенной активности N от времени облучения t выраженного в периодах полураспада $T_{1/2}$



Например для алюминия-28 ($T_{1/2} = 2,3$ мин), при $t_{обл} = 10$ мин ($t_{обл} \approx 4T_{1/2}$) наведенная активность практически будет равна активности насыщения, а для натрия ($T_{1/2} = 15$ ч; $t_{обл} \approx 0,01T_{1/2}$) она составит тысячные доли активности насыщения, т.е. практически будет отсутствовать.

Таким образом, выбирая время облучения, можно добиться того, что наведенная активность одних элементов будет максимальной, а других – ничтожно мала.

На практике, как правило, под воздействием потока нейтронов активируется не только определяемый, но и другие элементы.

Для селективного определения содержания интересующего элемента пользуются следующими методическими приемами. Время активации t_a выбирают таким, чтобы число активированных ядер определяемого элемента было максимальным по сравнению с ядрами элементов наполнителя.

После окончания облучения наведенная активность уменьшается со временем согласно закону радиоактивного распада.

Если период полураспада определяемого элемента значительно меньше периода полураспада сопутствующего элемента, то при небольшом времени активации вклад наведенной активности сопутствующего элемента будет незначительным. Существенно уменьшить мешающий вклад короткоживущих радионуклидов можно путем выбора соответствующей паузы (времени остывания) между началом измерения наведенной активности и окончанием активации.

При различии в периодах полураспада активируемых элементов пользуются анализом кривой распада.

Повысить избирательность нейтронного активационного анализа можно, используя различия в видах и энергии наведенного излучения.

Если определяемый элемент испускает только бета-излучения, а сопутствующий – гамма-излучение, то селективность анализа обеспечивается применением детектора, чувствительного к бета-излучению и малоэффективного к гамма-излучению.

Наоборот, используя детектор гамма-излучения, обладающий низкой эффективностью, к мешающему бета-излучению, можно анализировать радионуклиды, испускающие гамма-излучение. В последнем случае повышения селективности можно достичь окружением детектора фильтром-поглотителем бета-излучения. Аналогичный прием, связанный с экранированием детектора, используется в случае, когда радионуклиды анализируемого и мешающего элементов излучают бета-излучение различных энергий.

Наиболее простая задача активационного анализа возникает при условии, когда определяемый элемент испускает более жесткое гамма-излучение. В этом случае ограничиваются применением простой интегральной аппаратуры, регистрирующей кванты с энергией выше заданного уровня.

Методические возможности нейтронного активационного анализа могут быть существенно расширены при избирательном выборе энергии нейтронов.

Как правило, нейтронное излучение, испускаемое ампульными (α, n) источниками, является полиэнергетическим.

Для создания моноэнергетического потока нейтронов, например тепловых, полиэнергетический источник размещают в замедлителе, обладающем низким значением эффективного сечения радиационного захвата тепловых нейтронов.

В парафиновом замедлителе максимум плотности потока тепловых нейтронов от $Po-Be$ источника находится на расстоянии около 2 см, а для генератора нейтронов – около 4 см.

Если определяемый элемент активируется под действием быстрых нейтронов, применяются меры для исключения интерферирующих реакций на тепловых нейтронах.

К таким мерам относятся выбор и использование моноэнергетических нейтронов от генератора либо экранирование образца кожухом, содержащим аномальный поглотитель тепловых нейтронов.

Например слой кадмия толщиной 1 мм уменьшает поток тепловых нейтронов в 10^6 раз.

В зависимости от типа реакции, под действием которой возникает радиоактивный изотоп, необходимо осуществить выбор источника нейтронов.

При нейтронно-активационном методе на тепловых нейтронах следует применить калифорниевый ($Cf - 252$) нейтронный источник с относительно низкой средней энергией нейтронов (менее ~ 2 МэВ).

При нейтронно-активационном методе на быстрых нейтронах необходимо пользоваться источниками типа $Po-Be$ (средняя энергия около 4-5 МэВ) или $Pu-Be$. Правильный выбор типа источника в зависимости от поставленной задачи позволяет снизить влияние интерферирующих реакций, создающих фон.

Величина фонового γ -излучения при реализации НАМ в общем случае состоит из трех составляющих:

1. Естественная радиоактивность горных пород, веществ в скважине, материалов прибора и космическое излучение.

2. Составляющая от собственного гамма-излучения источника нейтронов и гамма-излучения, возникающая при неупругом рассеянии быстрых и радиационном захвате тепловых нейтронов в горной породе, скважине и материалах скважинного прибора.

3. Составляющая наведенной гамма-активности в горной породе, скважине и материалах скважинного прибора, обусловленная интерферирующими реакциями (реакциями не на определяемом элементе).

Первая составляющая снижается выбором оптимального энергетического диапазона регистрируемых гамма-квантов, т.е. используется различие в энергиях γ -излучения, обусловленное распадом искусственно полученных радиоактивных изотопов, и гамма-излучения от естественных радиоизотопов.

Величина собственного гамма-излучения источника может быть уменьшена выбором оптимальной длины зонда. Чем больше длина зонда, тем вклад от собственного гамма-излучения источника меньше.

Таким же образом снижается вклад от мгновенного гамма-излучения, сопровождающего неупругое рассеяние быстрых и радиационный захват тепловых.

Основная трудность, возникающая при реализации НАМ, заключается в том, что под действием нейтронов активируются, как правило, несколько элементов, включая и определяемый. Исходя из общей схемы активационного анализа, заключающегося в активации, паузе и измерении наведенной активности, следует выделить следующие способы выделения наведенной активности определяемого элемента:

а) если $T_{1/2}$ определяемого элемента значительно меньше, чем у мешающего элемента, то при малом времени активации доля активности от мешающих элементов будет незначительней;

б) если $T_{1/2}$ определяемого элемента значительно больше, чем у мешающего элемента, то при достаточно большой паузе влияние короткоживущих изотопов будет незначительным.

Применение нейтронного активационного анализа в лабораторных условиях

Нейтронный активационный метод в лабораторных условиях применяется для элементного анализа различных геологических объектов (горные породы, руды, минералы и др.). Разработаны экспрессные методики с использованием различных типов источников нейтронов для определения содержания большого круга элементов периодической системы.

Активационное определение низких и высоких концентраций анализируемых элементов имеет специфические особенности.

При анализе объектов, содержащих низкие концентрации определяемого элемента важным метрологическим критерием является достижение относительно высокой чувствительности.

При анализе макросодержаний вопросы обеспечения чувствительности несущественны, что снижает требования к мощности применяемых источников нейтронов и аппаратурному обеспечению анализа.

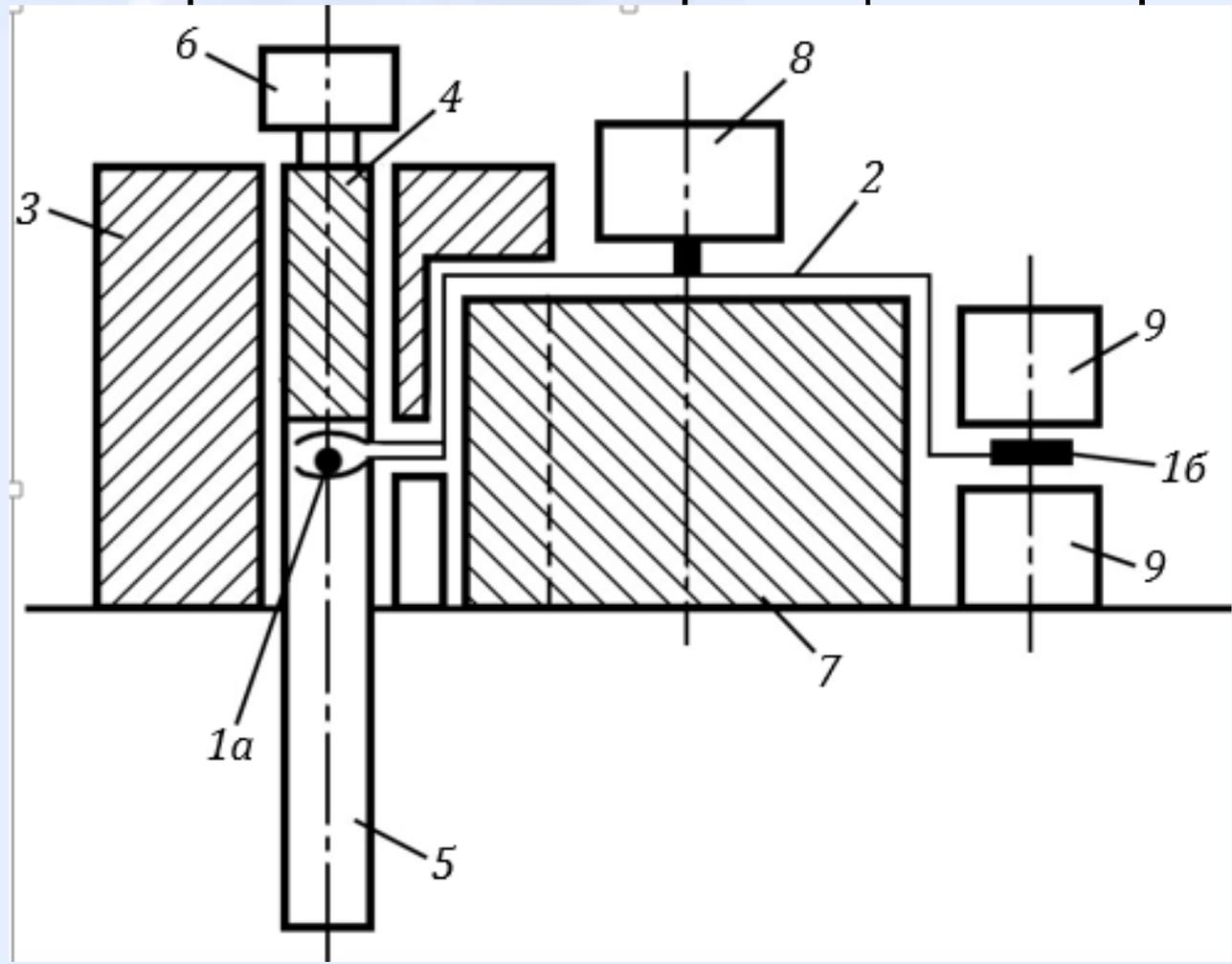
Применение генераторов нейтронов позволяет существенно расширить спектр анализируемых элементов за счет использования ядерных реакций на быстрых нейтронах (n, p), (n, α) и др. с включением анализа легких элементов, имеющих малые сечения активации.

Возможности нейтронного активационного анализа геологических объектов на многие элементы с различными источниками нейтронов и с достигнутыми порогами чувствительности представлены в работе.

В настоящее время разработаны методики и специализированные измерительные комплексы для анализа фторсодержащих, алюмосиликатных, золотоносных образований и др.

Казахским филиалом ВИРГ создана установка для экспрессного определения фтора. Аналитической реакцией служит реакция $^{19}\text{F} (n, \alpha) \text{N}^{16}$. Учитывая малый период полураспада нуклида N^{16} (7,3 сек) предусмотрен циклический режим анализа.

Схема активационной установки для экспресс-анализа на фтор с горизонтальным перемещением образцов



Механизм перемещения кассет с образцами 8, закрепленный на крышке защитного бака, позволяет поворачивать коромысло 2 на 180° , в результате которого кассеты меняются местами. Движение кассет происходит по окружности в горизонтальной плоскости.

Измерения наведенной активности образцов осуществляется двумя блоками детектирования 9 на основе сцинтилляционных счетчиков, сигналы от которых поступают на амплитудный анализатор.

Масса анализируемого образца 50-200 грамм. Крупность около 3 мм. Время активации 14с, время задержки 3с для перемещения облученного образца к измерительному устройству, время измерения активности – 14с.

Для минимизации статистической погрешности осуществляют 5 циклов измерений.

Нейтронно-активационный метод определения фтора не уступает химическому анализу по точности и заметно превосходит по производительности.

Анализ алюмосиликатного сырья

Нейтронно-активационный метод на алюминий и кремний может осуществляться по нескольким ядерным реакциям, идущим на ядрах этих элементов с использованием как радиоактивных источников, так и генераторов нейтронов. Применяемые методики основаны на реакциях $Al^{27} (n,\gamma) Al^{28}$ и $Si^{28} (n,p) Al^{28}$, приводящих к одному и тому же радиоизотопу.

Первая реакция идет на тепловых нейтронах, вторая – на быстрых с порогом 3,9 МэВ. Это позволяет определять содержание Al и Si при одновременном их присутствии в пробах. Проба подвергается активации дважды: полным спектром нейтронов, а затем только быстрыми нейтронами при окружении пробы кадмиевым экраном. Суммарная наведенная активность Al^{28} составляет

$$A_1 = A_{Al} + A_{Si}, \quad (2)$$

$$A_2 = a \cdot A_{Al} + b \cdot A_{Si}, \quad (3)$$

где a и b – коэффициенты, характеризующие снижение вклада реакций на Al и Si за счет кадмиевого экрана.

Коэффициенты a и b находятся путем измерения активности эталонных образцов с известными концентрациями Al и Si .

Определение концентрации Al и Si проводят исходя из выражений (2), (3).

Таким образом, активация образцов проб в каналах с различным энергетическим спектром нейтронов, позволяет отдельно оценивать концентрации Al и Si .

Порог определения Al_2O_3 на установке Нейтрон – 2М с мощностью $Po-Be$ источника $2 \cdot 10^7$ нейтрон/с составил около 0,1%. Погрешность анализа около 1,3 %.

Нейтронный активационный анализ геологических проб на золото основан на реакции $Au^{197} (n, \gamma) Au^{198}$ с регистрацией наведенного гамма-излучения с энергией 0,412 МэВ. Период полураспада Au^{197} составляет 64 час. Время активации выбрано 24 час. Временная пауза 24 часа выбрана для снижения мешающего вклада радионуклидов с относительно небольшими периодами полураспада (Na^{24} , Mn^{56} , As^{76}).

Наведенная активность образцов измерялась спектрометром на основе полупроводникового Ge (Li) – детектора. При использовании нейтронного источника калифорний – 252 с выходом $6 \cdot 10^8$ нейтрон/сек предел обнаружения составил 0,4 г/т.

Высокая чувствительность активационного анализа на золото была достигнута при облучении геологических образцов весом 1г потоком реакторных нейтронов 10^{13} н/с в течение 5 часов и измерении активности Au¹⁹⁸ в течение 1 час.

Для определения ванадия используется реакция V⁵¹ (n γ) V⁵² с регистрацией β -излучения или γ -излучения V⁵², имеющего период полураспада 3,8 мин. Мешающими элементами являются алюминий и медь.

Д.И. Лейпунская и З.Е. Гауэр разработали методику анализа титаномагнетитовых руд на ванадий. Время активации 6 мин, измерение β -активности в течение 12 мин. Начиная с t=5 мин график изменения радиоактивности соответствовал распаду V⁵². Содержание ванадия определяли сравнением с эталоном. Порог чувствительности 0,1% при активности Po-Be источника 3-10 кюри.

Анализ горных пород на содержание марганца проводится по реакции (n, γ) с регистрацией γ -излучения Mn^{56} с энергией 0,84 МэВ..

Нейтронный активационный анализ углей в основном связывается с благоприятными активационными характеристиками золообразующих элементов, в частности алюминия и кремния, составляющих устойчивую часть минеральной (золообразующей) массы угля.

Определение зольности по суммарному содержанию алюмосиликатов проводится по наведенной активности радионуклида Al^{28} , образующегося за счет активации кремния на быстрых нейтронах и алюминия на тепловых нейтронах. Исследования нейтронной активации углей с помощью Po-Be источника, выполненными Г.С. Возженниковым и И.И. Бредневым, показали, что значительная часть наведенной активности обусловлена распадом Al^{28} . Относительно низкий уровень помех является одним из основных достоинств активационного метода применительно к анализу углей. Расхождение между химическим и активационным анализами зольности составило около 1% абс.

Р. Кочем предложено для определения углерода использовать реакцию $C^{12}(n, p)B^{12}$, протекающую под действием быстрых нейтронов (порог реакции 13,6 МэВ) с регистрацией β -излучения радионуклида B^{12} . Аномально высокая энергия β -излучения обеспечивает достаточно высокую селективность анализа. При использовании генератора нейтронов с потоком $5 \cdot 10^9$ нейтрон/с и времени анализа 3 мин относительная погрешность определения углерода составила около 5%.

Нейтронный активационный каротаж

Нейтронные активационные исследования пород и руд в скважинах существенно отличаются от лабораторных измерений. При измерении наведенной активности в скважинных условиях регистрируется лишь достаточно жесткое гамма-излучение. Регистрация заряженных частиц и низкоэнергетического гамма-излучения исключается ввиду их поглощения в породе, скважине и скважинном приборе.

Наведенный активационный эффект в скважине зависит от пространственного распределения нейтронов и гамма-излучения, которое зависит не только от ядерно-физических свойств исследуемой породы, но и от скважинных условий измерений.

Фоновое излучение в условиях скважины имеет значительно более сложный компонентный состав, чем при проведении активационного анализа в лабораторных условиях. Это обусловлено тем, что нейтронный источник не удается удалить на достаточное расстояние от детектора гамма-излучения, который находится в поле действия нейтронов и гамма-квантов как во время активации исследуемой породы, так и в процессе измерения активационного эффекта. Это приводит к возникновению фонового гамма-излучения (мгновенного гамма-излучения за счет неупругого рассеяния быстрых и радиационного захвата тепловых нейтронов и активационных эффектов в конструкционных материалах скважинного прибора, стальной обсадной колонны, цемента).

Спектры активационного гамма-излучения горных пород, измеренные в скважинах, существенно отличаются от аналогичных спектров, полученных в лабораторных условиях, что создает дополнительные сложности в идентификации радионуклидов.

Связь между наведенной активностью и концентрацией элемента в условиях НАК имеет более сложный характер. Перечисленные особенности активационных исследований в условиях скважины существенно ограничивают возможности метода, как по числу определяемых элементов, так и по чувствительности и точности анализа по сравнению с лабораторными условиями.

Однако во многих случаях нейтронный активационный метод дает полезную информацию, недоступную другим геофизическим методам исследования скважин, с получением значительного экономического эффекта.

Нейтронные активационные исследования в скважинах проводят в дискретном (точечном) и непрерывном режимах измерений.

Характерными особенностями точечного варианта НАК являются: неподвижное положение скважинного прибора в течение выбранного времени активации в выбранной точке разреза и измерения активационного эффекта, размещение нейтронного источника на значительном расстоянии (обычно более 1,5-2 метра) от детектора, позволяющее снизить до максимума фоновое гамма-излучение, точное совмещение положения детектора гамма-излучения при измерении активационного эффекта с положением источника при активации.

Наряду с точечным активационным каротажем в ряде случаев целесообразно проведение непрерывного каротажа, при котором интенсивность активационного гамма-излучения пород измеряется в процессе непрерывного перемещения скважинного прибора по стволу скважины (источник нейтронов движется впереди детектора гамма-квантов).

Очевидно, что непрерывный активационный каротаж целесообразен для выявления наведенной активности радионуклидов, имеющих небольшой период полураспада.

Влияние скважинных условий

Активационный эффект практически не зависит от изменения диаметра сухой скважины. Наличие промежуточной зоны (глинистая корка, каверны, обсадная колонна и др.) снижают активационный эффект за счет поглощения наведенного гамма-излучения.

Кроме того промежуточная зона, расположенная между источником нейтронов и исследуемой горной породой сдвигает радиус исследований и уменьшает долю нейтронов, достигающих до породы, что уменьшает число активированных атомов.

Влияние скважинных условий в большей степени сказывается на результаты НАК на быстрых нейтронах. Экспериментальными исследованиями К.И. Якубсона показано, что величина наведенной быстрыми нейтронами активности песчаника уменьшилась почти в два раза при увеличении диаметра скважины с 90 до 137 мм.

Как показал С.А. Кантор, увеличение длины зонда от 0 до 100 см приводит к росту глубинности не более чем на 20-30%. Эта оценка определяет различие в глубинности НАК и НГК.

Согласно экспериментальным оценкам К.И. Якубсона и К. Эйфе, глубинность НАК на тепловых нейтронах по сравнению с глубиной НГК меньше на 10-20%, что составляет 16-18 см для песчаника.

Глубинность активационного метода на быстрых нейтронах существенно ниже, чем глубинность НАК на тепловых нейтронах.

Так, глубинность НАК на флюорит оказалась равной 4 см в заложенной водой скважине диаметром 110 мм.

При активации кремния быстрыми нейтронами глубинность составила 6 см, а при активации на тепловых нейтронах 12,3 см.

Возможности НАК на рудных месторождениях связаны прежде всего с анализом на фтор, медь, марганец и изучением бокситов (анализ алюминия).

НАК на фтор. Возможности применения НАК в непрерывном режиме обусловлены тем, что при активации как тепловыми, так и быстрыми нейтронами фтор образует короткоживущие радионуклиды F^{20} , O^{19} и N^{16} .

При использовании Po-Be источника 5 кюри, длине зонда 1 м и скорости каротажа 250 – 300 м/час записывали две каротажные диаграммы: при спуске – естественное гамма-излучение и мгновенное гамма-излучение радиационного захвата нейтронов (источник размещался выше детектора); при подъеме – суммарное гамма-излучение, включая и наведенную гамма-активность.

По разности двух диаграмм оценивался активационный эффект. Методика характеризовалась низкой чувствительностью к фтору из-за значительного фонового гамма-излучения и низкой эффективности газоразрядных счетчиков.

Более совершенной является методика НАК на фтор по радионуклиду N^{16} , возникающему под действием быстрых нейтронов и испускающему гамма-излучение с энергией 6,14 МэВ.

Использование спектрометрической аппаратуры, сцинтилляционного детектора большого размера и малый период полураспада (7,3 сек) позволили при длине зонда 1,5м, скорости каротажа 400 м/час и активности Po-Be источника 5 кюри добиться порога чувствительности 0,2% фтора.

НАК алюмосиликатов. Сравнительно небольшой период полураспада Al^{28} , возникающего при активации алюминия тепловыми нейтронами, позволяет проводить непрерывный каротаж на Al. Применение одноканального спектрометра, ограничивающего вклад естественного гамма-излучения, скорости каротажа 40-60 м/час при длине зонда 2м порог чувствительности составил 0,2-0,5% Al_2O_3 .

Активация кремния на быстрых нейтронах является мешающим фактором. Вклад активационного эффекта за счет кремния в сухих скважинах достигает 20%, а в заполненных водой не превышает 10% при паритетном соотношении массовых долей Al_2O_3 и SiO_2 . Помехи за счет кремния можно устранить применением Po-B источника, энергия нейтронов которого меньше порога реакции Si^{28} (4,2 МэВ).

Раздельное определение глинозема и кремнезема возможно способом двух источников: последовательное облучение Po-Be и Po-B источниками и оценка кремнезема по разностному эффекту. Невысокая чувствительность обусловлена слабым активационным эффектом на быстрых нейтронах и значительным влиянием скважинных условий.

НАК на марганец. Активационное определение марганца возможно по периоду полураспада Mn^{56} (2,5 час) и по энергии гамма-излучения с энергией 0,84 МэВ. Основной помехой служит алюминий, влияние которого исключается путем выбора паузы (15-20 мин), в течение которого наведенная активность Al уменьшается более чем в 100 раз. Применением спектрометрии наведенного гамма-излучения и оптимальных временных параметров достигнута точность анализа марганца ~ 10% отн.

Трудность количественного определения Mn связана с концентрационным вырождением эталонировочного графика при содержании марганца более 20% за счет аномально большого сечения активации у Mn^{55} (13,3 барн).

НАК на медь. Идентификация меди осуществляется по двум ее радиоактивным изотопам: короткоживущему Cu^{66} с $T_{1/2} = 5,1$ мин, $E = 1$ МэВ и долгоживущему Cu^{64} с $T_{1/2} = 12,8$ час, $E = 0,56$ МэВ. Эти радионуклиды образуются по реакциям $\text{Cu}^{65} (n, \gamma) \text{Cu}^{66}$ и $\text{Cu}^{63} (n, \gamma) \text{Cu}^{64}$, идущим на тепловых нейтронах. Распространенность стабильных изотопов составляет соответственно 30,9 и 60,1%. Наибольшей чувствительностью и точностью характеризуется методика по долгоживущему изотопу Cu^{64} . Выбором оптимального временного режима измерений (активация, пауза, измерение) удастся исключить влияние короткоживущей составляющей, обусловленной активацией алюминия и кремния, а также Mn^{56} , возникающего за счет железа.

Задача количественного определения меди с исключением влияния Mn^{56} за счет временной селекции сводится к учету влияния Na^{24} с близким к Cu^{64} периодом полураспада (~15 час). Энергии гамма-излучения меди и натрия различаются почти в 3 раза, поэтому их разделяют с помощью гамма-спектрометрических измерений в двух интервалах спектра с последующим решением системы двух уравнений. Длительность паузы (8-15 час) выбрана для более полного распада Mn^{56} .

Активационный каротаж на медь выполняют в дискретном режиме с шагом 25-100 см. При использовании источника нейтронов мощности $2 \cdot 10^7$ нейтрон/с порог чувствительности составил 0,2-0,3% по долгоживущему изотопу и 0,5-0,8% меди при анализе по короткоживущему изотопу Cu^{66} .

НАМ при исследовании нефтяных скважин

Нейтронный активационный метод при исследовании нефтяных скважин может решать следующие задачи:

- контроль за положением водонефтяного контакта и установление характера насыщения пластов;
- контроль за техническим состоянием скважин и определение скорости движения пластовых вод.

При решении этих задач нейтронным активационным методом в качестве индикаторных элементов могут использоваться углерод и кислород, входящие в состав нефти и воды, а также натрий и хлор (минерализованная вода).

Благоприятные нейтронно-активационные характеристики имеет кислород. Однако методики НАК на кислород пока малоэффективны, ввиду значительного влияния кислорода, входящего в состав скелета породы.

На месторождениях с высокой минерализацией пластовых вод наибольшее развитие для расчленения нефтяных и водоносных пластов получил метод наведенной активности Na и Cl.

НАК по натрию основан на регистрации гамма-излучения Na^{24} , возникающего по реакции $\text{Na}^{23} (n, \gamma) \text{Na}^{24}$. НАК по хлору использует наведенную активность радионуклида Cl^{38} , возникающего также под действием тепловых нейтронов.

Основными дестабилизирующими факторами в обоих случаях являются конкурирующие реакции $\text{Mn}^{55} (n, \gamma) \text{Mn}^{56}$ (марганец находится в составе обсадной колонны) и $\text{Al}^{27} (n, \gamma) \text{Al}^{28}$ (алюминий находится в составе горных пород). Влияние Al^{28} легко устраняется за счет значительно меньшего периода полураспада по сравнению с Na^{24} и Cl^{38} .

Наведенная активность Mn^{56} зависит от содержания в пластовой жидкости поглотителей тепловых нейтронов. За счет перераспределения нейтронного поля активационный эффект обсадной колонны против пласта с минерализованной водой будет ниже, чем против нефтенасыщенного пласта.

Таким образом, наведенная активность марганца используется в данном случае как параметр, характеризующий плотность тепловых нейтронов в зоне, расположенной вблизи от колонны.

Нейтронный активационный метод на Mn в данном случае можно рассматривать как разновидность нейтрон-нейтронного каротажа.

Различные методики нейтронной активации Na и Cl применительно к конкретным условиям нефтяных месторождений отличаются в основном временными режимами измерений и алгоритмами обработки результатов.

Сравнительно большие периоды полураспада образующихся радионуклидов позволяют реализовать НАК только в дискретном режиме.

При использовании Na в качестве индикаторного признака облучение и измерение активности проводили в течение 4 час. Такой режим при выборе точек на расстоянии, равном длине зонда, позволял оптимизировать затраты. По полученным точечным замерам нейтронной активации с использованием номограмм определяют составляющие активационного эффекта от натрия I_{Na} и I_{Cl} .

Определение водонефтяного контакта (ВНК) по активации хлора осуществляют в дискретном режиме измерений: $t_a=40$ мин; $t_o= 20$ мин; $t_u=40$ мин. Разделение составляющих проводят с помощью номограммы.

Нейтронный активационный метод может быть использован для контроля за движением пластовых вод на нефтяных месторождениях.

Отклонение спада наведенной активности радионуклида от экспоненциального закона распада при взаимном движении исследуемой среды и детектора, регистрирующего наведенную активность, положено в основу обнаружения движения вод.

В качестве индикаторного элемента для решения данной задачи выбирается такой, чтобы скорость распада наведенной активности была существенно меньше скорости выноса радионуклида с жидкостью.

При использовании активационного метода для контроля за движением пластовых вод и определения скорости проявляются его специфические особенности как разновидности известного метода радиоактивных (меченых) изотопов.

Различие лишь в том, что в НАМ используются искусственные радиоактивные изотопы, созданные путем облучения горных пород нейтронами.

При этом исключается закачка радиоактивных изотопов в пласт и не нарушается природное движение вод в скважинном пространстве.

Кроме того активационный метод позволяет определять практически мгновенную скорость движения вод в районе исследуемой скважины.

Известен опыт применения НАМ для определения источника обводнения скважин. Информация об источниках обводнения и их количественных характеристиках может быть получена при использовании зависимости показаний метода от скорости, направления и дебита притоков жидкости в стволе скважины и прискважинной зоне.

Информация о скорости и направлении получается из-за анализа вида кривых спада наведенной активности, либо из показаний детекторов, находящихся на различных расстояниях от источника.

Возможности НАМ в геолого-геофизических исследованиях далеко не исчерпаны. Совершенствование теории и методики нейтронных исследований, малогабаритные источники нейтронов с большой мощностью, высокопрецизионная ядерно-геофизическая аппаратура позволят расширить круг решаемых задач и будут способствовать дальнейшему развитию нейтронного активационного метода как высокочувствительного и оперативного инструментального метода анализа природных сред.

Контрольные вопросы

1. Физическая сущность нейтронного активационного метода (НАМ). Решаемые задачи.
2. Принципиальные отличия НАМ от НГМ.
3. Особенности реализации НАМ в лабораторной практике и скважинных условиях.
4. Уравнение активационного метода и определение концентрации элемента в сложном веществе.
5. Объясните природу зависимости наведенной активности от времени активации.
6. Из каких соображений выбирают оптимальное время активации в НАМ?
7. Что такое время охлаждения (пауза) в НАМ. Укажите примеры его выбора.
8. Назовите основные параметры активационного метода, позволяющие повысить избирательность НАМ.

Контрольные вопросы

9. Что означает «сечение активации»? Назовите благоприятные элементы с точки зрения постановки НАМ.
10. Особенности дискретного (точечного) и непрерывного нейтронного активационного каротажа скважин. Выбор длины зонда.
11. Укажите основные факторы, обуславливающие фоновое гамма-излучение при НАК.
12. Что такое конкурирующие ядерные реакции в НАМ? Пути их учета и исключения.
13. По каким причинам невозможен непрерывный НАК на долгоживущие радионуклиды?
14. Обоснуйте влияние факторов (вещественный состав пород, скважинные условия, энергия излучения) на глубинность НАК.
15. Как рассчитать оптимальную скорость перемещения скважинного прибора при непрерывном НАК?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Объясните сущность влияния скважинных условий на результаты НАК на тепловых и быстрых нейтронах.
2. Основные задачи НАК при исследовании нефтяных скважин.
3. Назовите основные индикаторные элементы, используемые для оценки положения водонефтяного контакта.
4. На чем основана возможность НАК для контроля за движением 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!