

Активационные методы

Доцент кафедры месторождений полезных
ископаемых Шарова Татьяна Викторовна
Преподаватель кафедры месторождений полезных
ископаемых Рыбин Илья Валерьевич

Активация – это процесс получения радиоактивного вещества при ядерных реакциях при облучении стабильных ядер нейтронами, гамма-квантами, протонами или другими частицами. Активационный анализ относится к основным ядерно-физическим методам обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды. Активационные методы впервые применили химики Д. Хевеши и Г. Леви (1936). Активационный анализ можно определить как метод определения состава исследуемых объектов качественно и количественно путем измерения радиоактивного излучения ядер, возбуждаемых в процессе ядерных превращений. Сущность активационного анализа сводится к облучению образцов горных пород быстрыми или медленными нейтронами и изучению наведенной искусственной радиоактивности. При этом изменяется как время облучения, так и время изучения наведенной альфа-, бета- или гамма-активности. Для облучения пород и руд используют разнообразные источники нейтронов, в которых нейтроны обычно получают в результате ядерных реакций.

Наиболее распространенная операция при измерении наведенной активности - получение и анализ аппаратурных гамма-спектров, т.е. энергетических спектров взаимодействия гамма-квантов с веществом детектора. Важнейшим элементом спектрограммы является ряд фотопиков, каждый из которых соответствует образованию в веществе детектора фотоэлектронов с энергией, равной энергии гамма-квантов. Набор фотопиков, таким образом, характеризует гамма-спектры присутствующих в образце радионуклидов, что позволяет идентифицировать эти нуклиды в смеси.

Для регистрации гамма-квантов пользуются сцинтилляционными и полупроводниковыми детекторами. В первом случае это обычно NaI(Tl) – кристалл йодида, активированный таллием, во втором – Ge(Li) – кристалл германия с присадкой лития.

Основные характеристики источников нейтронов – мощность источника, определяемая числом нейтронов, испускаемых в единицу времени (*нейтрон/сек.*), и энергетический спектр нейтронов. Нейтроны, равномерно распространяясь от источника во всех направлениях, создают в каждой точке пространства в окрестностях источника определенную плотность нейтронов n , равную числу нейтронов в единице объема (*нейтрон/см.³*). Активационный метод характеризуется повышенной чувствительностью к элементам, отличающимся высокой активационной способностью, таким как Al, Cd, Cu, K, Mn, Na, P, Si и др.

Известны многочисленные применения активационного анализа. Основные из них: анализ особо чистых веществ, геологических объектов и объектов окружающей среды; экспрессный анализ металлов и сплавов в промышленности; определение содержания микроэлементов в крови, плазме, тканях животных и растений; судебно-медицинская экспертиза.

Активационный анализ используется для определения следовых примесей в полупроводниковых материалах, металлах, метеоритах, лунных и земных горных пород, причём для определения нескольких элементов одновременно. Это позволяет получить информацию о термической и химической истории Земли, Луны, Марса и метеоритов, а также об источнике и возрасте

Геохимические применения активационного анализа включают космохимию, геохимию литосферы и гидросферы. Анализ используется для определения распространённости элементов в земной коре, выявления механизма кристаллизации магмы, и механизма возникновения осадочных пород, для определения абсолютного возраста минералов и т.п.

Активационный анализ неорганических материалов используется для определения примесей в чистых веществах, для анализа полупроводниковых материалов, а также для анализа воды и водных растворов.

Использование активационного анализа в криминалистике и судебной медицине также хорошо известно. Здесь определяют распределение следовых элементов в пулях, ножах, картинах, посуде, вине и пище и т.п., как-то связанных с преступлениями. Такая идентификация быстра и не разрушает объект исследования. Она применяется как реальное доказательство в суде. Примером является доказательство, что Наполеон был отравлен, полученное по содержанию мышьяка в волосах. Другие примеры - доказательство, что человек был застрелен выстрелом именно из этого нагана, или был отравлен именно этим напитком.

Применение активационного анализа в науках об окружающей среде является рутинным. Определение содержания примесных элементов в атмосфере городов, в озёрах, реках и т.п. используется для изучения миграции загрязнителей в различных экосистемах. Кроме того, некоторые следовые элементы биологически важны сами по себе.

Классическим примером является ртуть, содержание которой в рыбе и других пищевых продуктах обычно определяется активационным анализом. Часто активационный анализ сочетается с методом радиоактивных индикаторов, когда в различных стабильные изотопы заменяют радиоактивные метки. После проведения диагностики, концентрации этих зондов измеряют радиоактивационным методом.

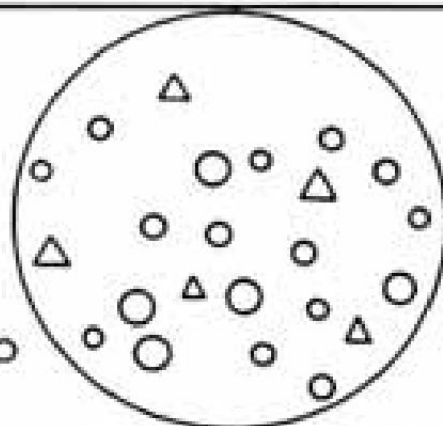
Активационный анализ активно применяется при определении состава биологического материала, такого, как органы позвоночных, кровь млекопитающих, морские организмы, высшие растения и т.п.

Применяется активационный анализ и при анализе хроматограмм.

В *нейтронно-активационном анализе* выделяют активационный анализ на быстрых нейтронах, тепловых и резонансных, в соответствии с энергией нейтронов, используемых для активации. Все эти методы имеют как определенные положительные моменты, так и специфичные сложности, не характерные другим методам НАА.

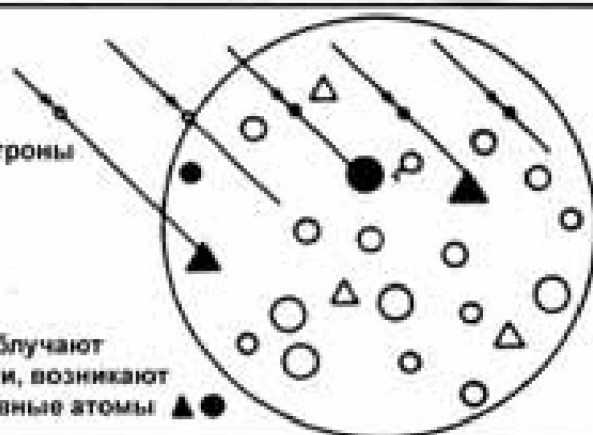
Основные стадии для нейтронного активационного анализа представлены на рисунке

Образец состоит из
основного материала \circ
со следами другого
материала \triangle

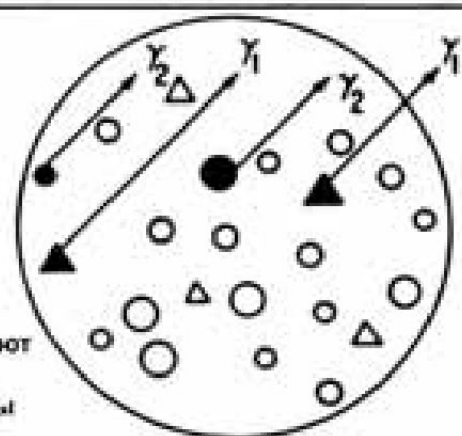


Нейтроны

Образец облучают
нейтронами, возникают
радиоактивные атомы \blacktriangle \bullet



Гамма-лучи позволяют
идентифицировать
примесные элементы



Широкое распространение нейтронно-активационного анализа (НАА) обусловлено его высокой чувствительностью, связанной с большим сечением реакции захвата ядрами тепловых нейтронов и наличием мощных источников нейтронов (ядерные реакторы, ускорители, нейтронные генераторы).

Чувствительность (предел обнаружения) большинства элементов при использовании реакторных нейтронных потоков $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ составляет $(10^{-5} - 10^{-10}) \%$.

Однако в НАА применяются и изотопные источники нейтронов.

В НАА могут использоваться также и другие реакции, вызываемые нейтронами: (n,p) , (n,α) , (n,f) . Первые две протекают обычно на высокоэнергетических нейтронах, но для некоторых лёгких ядер происходят и на тепловых нейтронах. Реакция деления (n,f) используется для определения делящихся изотопов урана и плутония в природных объектах.

Из методов НАА чаще всего применяется активационный анализ на тепловых нейтронах. Такое значение этот метод приобрел, так как он применим к основной доле элементов периодической системы и чаще всего отличается высокой чувствительностью обнаружения.

НАА обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Отсутствует химическая подготовка пробы, что исключает погрешности за счёт привноса или удаления элементов вместе с реактивами.

Методика НАА заключается в облучении исследуемых проб в реакторе потоком тепловых нейтронов и последующем измерении наведенной активности на гамма-спектрометре с полупроводниковыми детекторами.

Метод запаздывающих нейтронов (МЗН). Как известно, деление ядер нейтронами сопровождается испусканием нескольких мгновенных нейтронов деления. Испускание некоторых нейтронов, связанное с процессом деления ядер, задерживается на время, лежащее в пределах от долей секунды до минуты. Эти запаздывающие нейтроны появляются, когда в результате β -распада продуктов деления образуются такие высоко возбужденные состояния дочерних ядер, что испускание нейтронов становится энергетически возможным. Образовавшиеся при этом осколки после β -распада также могут испускать нейтроны, если окажется достаточной энергия их возбуждения.

Выход запаздывающих нейтронов (ЗН) при делении тяжелых ядер изучался с самого начала использования ядерной энергии, так как испускание ЗН имеет фундаментальное значение для реализации контролируемой цепной ядерной реакции деления. Некоторые продукты деления являются предшественниками запаздывающих нейтронов. На практике считается возможным разделить их на шесть групп. В каждой группе предшественники распадаются по экспоненциальному закону с характерным для группы периодом полураспада, который определяет скорость испускания запаздывающих нейтронов деления.

Относительный и абсолютный выходы предшественников запаздывающих нейтронов и в некоторой степени их постоянные распада зависят от особенностей процесса деления, т. е. от типа делящегося ядра и энергии нейтрона, вызывающего деление. Выходы и временные характеристики ЗН из нейтронно-индуцированного деления главных и минорных реакторных изотопов являются важными ядерными константами, используемыми в расчетах кинетики ядерных реакторов.

Для реакторов с высоким выгоранием, предназначенных, в частности, для трансмутации минорных актинидов, таких, как Np и Am, точное знание выходов ЗН является важным для улучшения динамики реактора, условий его безопасности и экономичности. К сожалению, характеристики ЗН для этих ядер изучены недостаточно, особенно для области тепловых нейтронов. Большинство экспериментальных методик измерения выхода ЗН предусматривают перемещение изучаемого образца от места облучения к детектору для их регистрации. Однако эти методы не являются универсальными, так как не позволяют с хорошей точностью определять характеристики ЗН, которые испускаются в первую секунду после акта деления.