**«Использование радиоактивационного метода в анализе объектов окружающей природной среды»**

**Содержание**

Введение

Глава 1. Теоретические основы радиоактивационного анализа

Глава 2. Применение радиоактивационного анализа

Глава 3. Современное оборудование

Литература

**ВВЕДЕНИЕ**

Методы анализа, основанные на радиоактивности, возникли в эпоху развития ядерной физики, радиохимии, атомной техники и с успехом применяются в настоящее время при проведении разнообразных анализов, в том числе в промышленности и геологической службе.

Основными достоинствами аналитических методов, основанных на измерении радиоактивного излучения, являются низкий порог обнаружения анализируемого элемента и широкая универсальность. Радиоактивационный анализ имеет абсолютно низший порог обнаружения среди всех других аналитических методов (10-15 г). Достоинством некоторых радиометрических методик является анализ без разрушения образца, а методов, основанных на измерении естественной радиоактивности, – быстрота анализа. Ценная особенность радиометрического метода изотопного разведения заключена в возможности анализа смеси близких по химико-аналитическим свойствам элементов, таких, как цирконий – гафний, ниобий – тантал и др.

Дополнительные осложнения в работе с радиоактивными препаратами обусловлены токсичными свойствами радиоактивного излучения, которые не вызывают немедленной реакции организма и тем самым осложняют своевременное применение необходимых мер. Это усиливает необходимость строгого соблюдения техники безопасности при работе с радиоактивными препаратами. В необходимых случаях работа с радиоактивными веществами происходит с помощью так называемых манипуляторов в специальных камерах, а сам аналитик остается в другом помещении, надежно защищенном от действия радиоактивного излучения.

Радиоактивные изотопы применяются в следующих методах анализа:

метод осаждения в присутствии радиоактивного элемента; метод изотопного разбавления; радиометрическое титрование; активационный анализ; определения, основанные на измерении радиоактивности изотопов, встречающихся в природе.

**ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОАКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА (АКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА)**

Активационный анализ относится к основным ядерно-физическим методам обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды. Метод базируется на фундаментальных понятиях и данных о структуре атомных ядер, сечениях ядерных реакций, схемах и вероятностях распада радионуклидов, энергиях излучения, а также на современных способах разделения и предварительного концентрирования микроэлементов. Широкое распространение активационный анализ получил благодаря таким преимуществам перед другими методами, как низкие пределы обнаружения элементов (10–12–10–13 г), экспрессность и воспроизводимость анализа, возможность неразрушающего одновременного определения в пробе 20 и более элементов. Применение специальных химических методик и аппаратурных приемов позволяет определять фоновое содержание металлов в приземном слое атмосферы, следовые количества примесей в биологических объектах, особо чистых веществах и устанавливать химическую форму элементов в исследуемых пробах. Большое значение имеет возможность проведения анализа в диапазоне массы образцов от нескольких микрограммов (важно для труднодоступных образцов, например, метеоритов или лунного грунта) до нескольких сотен граммов. Следует отметить, что относительная погрешность определения содержания элементов в пробах активационным методом не выходит за пределы 10%, а воспроизводимость составляет 5–15% и может быть доведена до 0,1–0,5% при серийных анализах. В настоящее время имеется целый ряд разновидностей активационного анализа. Однако общим для всех этих методов является активация вещества нейтронами, гамма-квантами или заряженными частицами и последующая регистрация спектрального состава излучения возбужденных ядер или образовавшихся радиоактивных изотопов. Наиболее распространены первые два метода. Активационный анализ на заряженных частицах, в связи с их малым пробегом в веществе, используется главным образом для анализа тонких слоев и при изучении поверхностных эффектов.[1]

Для осуществления активационного анализа исследуемый образец (проба) подвергается облучению потоком бомбардирующих частиц, например нейтронов в ядерном реакторе. При этом образуются как стабильные, так и радиоактивные нуклиды (радионуклиды), характеризующиеся различными временами жизни и энергиями распада. Радиоактивность облученного образца прямо пропорциональна количеству образовавшихся радионуклидов. Поэтому количество радионуклида удобно выражать его активностью A, т. е. числом распадов в единицу времени, т.к. эту величину можно измерить с помощью различных детекторов. Уравнение для вычисления активности радионуклида выглядит так:

. (1)

Зная активность радионуклида A, содержащегося в образце на данный момент времени, можно рассчитать количество радиоактивных ядер и их массу:

, (2)

где m — масса радиоактивных ядер (г), M — массовое число радиоизотопа.

Скорость накопления радионуклида во время облучения исследуемой пробы можно описать дифференциальным уравнением:

, (3)

где σФNx — скорость образования радиоактивных ядер в пробе, λN — скорость их распада, Ф — плотность потока бомбардирующих частиц (см–2 с-1), σ — сечение реакции (см2), Nx — количество стабильного изотопа анализируемого элемента в облучаемой пробе.

Интегрируя уравнение (3), получим выражение для вычисления активности радионуклида, накопившегося в пробе за время облучения,

, (4)

где N — количество накопившихся радиоактивных ядер; tобл — время облучения.

Если время облучения намного больше периода полураспада tобл>>(8–10)Т1/2, то экспоненциальное слагаемое в (4) пренебрежимо мал по сравнению с единицей, и тогда

. (5)

Активность называется активностью насыщения или равновесной активностью.

Обычно после облучения какое-то время затрачивается на транспортировку пробы к установке детектирования, или проба специально выдерживается для распада мешающих анализу, более короткоживущих продуктов ядерных реакций. В результате распада активность определяемых радионуклидов тоже уменьшается в соответствии с выражением (1):

, (6)

где Aвыд — активность определяемого нуклида после выдержки; tвыд — время между концом облучения и началом измерения активности.

Вывод уравнения (4) сделан без учета уменьшения количества («выгорания») исследуемых стабильных ядер Nx в пробе при облучении, поскольку «выгорание» незначительно и заметно только для изотопов с большим сечением взаимодействия и при длительном облучении. Было также предположено, что плотность потока активирующих частиц во время облучения не меняется.

Ежегодно в мире проводится более сотни тысяч активационных анализов. В качестве примера можно упомянуть нейтронно-активационный анализ волос Исаака Ньютона, который был проведен в английском ядерном центре в Олдермастоне. Для исследования на присутствие золота и ртути облучение нейтронами продолжалось 5 дней, а на мышьяк, сурьму и серебро - до 14 дней. Оказалось, что содержание металлов с высокой токсичностью значительно превышало нормальный уровень, так количество ртути в волосах Ньютона в 40 раз превосходило норму. Полученные данные подтверждают предположение о том, что Ньютон в течение длительного времени болел вследствие ртутного отравления.

**Инструментальный и радиохимический анализ.** Облучение исследуемых проб приводит к образованию смеси радионуклидов различных химических элементов, входящих в пробу. Идентификацию отдельных радионуклидов осуществляют либо по их ядерно-физическим свойствам (энергия и вид испускаемых частиц, период полураспада), применяя для этих целей счетчики гамма-квантов и β-частиц и гамма-спектрометры, либо измеряя активность радионуклида в течение какого-то времени для установления его периода полураспада. Данные об интенсивности отдельных видов излучения, принадлежность которых установлена, используют для расчета содержания элементов в исследуемой пробе. На Рис.1 показан пример определения элементного состава образца по спектрам гамма-излучения ядер примеси.

Рис.1. Определение элементного состава образца по спектрам гамма-излучения.

Количество зарегистрированных в процессе анализа импульсов с учетом уменьшения активности во время измерения выражается следующим соотношением:

, (7)

где mx — масса определяемого элемента в пробе, Y — относительная распространенность изотопа, ν — квантовый выход излучения, ε — эффективность регистрации излучения данного вида, tизм — время измерения.

Если период полураспада радионуклида достаточно велик, т.е. то выражение (7) принимает вид:

. (8)

Используя выражения (7) или (8), по измеренным значениям ΔА вычисляют содержание исследуемого элемента mx в пробе. Заметим, что из последнего уравнения (8) следует, что с увеличением периода полураспада уменьшается число полезных зарегистрированных сигналов. Следовательно, экспрессность анализа будет выше при анализе проб по короткоживущим радионуклидам.

Приведенный метод определения содержания элемента по активности накопившегося радионуклида без привлечения эталона называется абсолютным методом. Однако в этом случае необходимо знать плотность потока и энергию бомбардирующих частиц. Например, при облучении проб реакторными нейтронами требуются данные о плотности потока и энергетическом спектре нейтронов, а также информация о величинах резонансных интегралов для облучаемых нуклидов, поскольку одни нуклиды (например, 23Na, 45Sc, 58Fe, 139La) преимущественно активируются тепловыми нейтронами, а другие (75As, 87Br, 121,123Sb, 181Ta, 197Au, 113,115In) и тепловыми, и резонансными нейтронами. Важным требованием в абсолютном методе является соблюдение постоянства потока активирующего излучения во времени. Необходимо также обеспечить измерение абсолютной активности накопившегося радионуклида с достаточной точностью.

Указанные выше трудности отсутствуют в относительном методе, при котором одновременно с анализируемой пробой облучается эталон с точно известным количеством определяемого элемента. Наведенные активности эталона и пробы измеряют в одинаковых условиях, а содержание определяемого элемента вычисляют из соотношения

, где mx и mэ — масса элемента в пробе и эталоне; Ах и Аэ — активность пробы и эталона, соответственно.

Такое исследование без разрушения образцов называют инструментальным активационным анализом. Если же при облучении пробы получается сложная смесь радионуклидов и ее невозможно расшифровать из-за совпадения или наложения близких по энергии гамма-квантов, то облученную пробу растворяют, проводят радиохимически чистое выделение отдельных элементов или группы элементов и затем по измеренной активности радионуклидов рассчитывают содержание элементов. Такой вариант называется активационным анализом с радиохимическим разделением.

Наряду с известными методами активационного анализа, к настоящему времени разработан ряд новых вариантов, в которых сочетаются техника активационного анализа и метод изотопного разбавления. Например, в безэталонном варианте с использованием субстехиометрии облученный образец растворяют, разделяют на две равные части mx1 и mx2. Далее к части mx1 добавляют известное количество стабильного носителя m0 и затем из обеих частей mx1 + m0 и mx2 выделяют одинаковые, субстехиометрические (меньшие стехиометрических) количества определяемого элемента δm, измеряют радиоактивность этих аликвот и вычисляют неизвестное содержание определяемого элемента:

.

Так как mx = mx1 + mx2 и mx1 = mx2, то

,

где А — активность радионуклида в пробе; Ax1 и Ax2 —активность аликвот, взятых из первой и второй половин раствора пробы соответственно; mx — неизвестная масса определяемого элемента в пробе. В этом методе использовано уменьшение удельной активности первой половины раствора из-за добавки стабильного носителя m0.

Важным параметром любого метода анализа является предел обнаружения, определяемый как наименьшая концентрация, при которой исчезает аналитический сигнал. Однако, для однозначной идентификации и тем более для количественного определения этот сигнал и, следовательно, концентрация должны иметь значительно (примерно на порядок) большую величину. Поэтому для оценки аналитических методов введена такая характеристика, как предел определения — минимальная концентрация, измеряемая с заданной погрешностью. Минимальная концентрация в активационном анализе зависит от минимальной активности, которая может быть измерена с заданной погрешностью. Подставив величину этой минимальной активности в уравнение (7), можно рассчитать минимальное количество вещества, доступное для определения при заданных условиях. Из соотношения (7) следует, что минимальная определяемая концентрация элемента в пробе будет тем ниже, чем больше сечение реакции и относительная распространенность активируемого изотопа и меньше период полураспада образующегося при облучении радионуклида.

Принято считать, что при количественном анализе радиоактивности необходимо регистрировать измерительным устройством не менее 18 имп/мин над фоном. Тогда при эффективности детектора 0,05 можно наблюдать минимальную активность Aмин, соответствующую 6 Бк. Если активация продолжается до получения активности насыщения, а время выдержки и измерения достаточно малы, то минимальное количество определяемого элемента в одном грамме анализируемой пробы, в соответствии с выражением (7), будет следующим:

,

где mxмин — минимальная масса определяемого элемента в одном грамме пробы, Амин = 6 Бк — минимальная наведенная активность определяемого элемента, поддающаяся измерению.

**Нейтронно-активационный анализ.** Ядра атомов большинства элементов легко поглощают нейтроны, особенно если скорость последних не очень велика. Это свойство атомных ядер и лежит в основе нейтронно-активационного анализа. В результате поглощения нейтронов ядрами чаще всего испускаются мгновенные гамма-лучи, поэтому такую ядерную реакцию называют радиационным захватом нейтронов и обозначают через (n,γ). Радиационный захват нейтронов приводит, как правило, к образованию радиоактивных ядер. Иначе говоря, увеличение числа нейтронов в ядре на единицу делает его нестабильным. Так при поглощении нейтронов ядрами золота 197Au в реакции 197Au(n,γ)198Au возникает радиоактивный изотоп золота 198Au с периодом полураспада 2.7 дня.

Рис. 2. При поглощении нейтронов ядрами золота 197Au в реакции 197Au(n,γ)198Au возникает радиоактивный изотоп золота 198Au с периодом полураспада 2.7 дня

Количество данного радиоактивного изотопа, образующегося в веществе при облучении нейтронами, прямо пропорционально количеству его стабильного предшественника и, следовательно, служит мерой содержания элемента в анализируемом объеме. Например, чем выше концентрация примесного золота, тем больше возникает радиоактивных ядер 198Au.

Активация нейтронами ведет преимущественно к появлению бета-активных ядер. В результате бета-распада дочернее ядро может оказаться не только в основном, но в возбужденном состоянии. На Рис.2 показана схема распада радиоактивного золота: изотоп 198Au, испуская бета-частицы, превращается в стабильный изотоп ртути, ядра которого в большинстве случаев возбуждены до энергии 412 кэВ. Снятие возбуждения сопровождается излучением фотонов с энергией 412 кэВ. Очевидно, что чем больше содержание золота, тем выше активность изотопа 198Au и тем интенсивнее будет гамма излучение с указанной энергией.

Важно, что каждый сорт радиоактивных ядер характеризуется собственной энергией гамма-излучения, сопутствующего бета-распаду. Это обеспечивает возможность избирательного определения одного или нескольких элементов. Обычно регистрируют гамма-лучи объектов, активированных нейтронами, в широком диапазоне энергий, вследствие чего получаемый гамма-спектр содержит информацию о концентрации целого ряда химических элементов.

Рассмотрим еще один пример применения метода для анализа содержания магния. Изотопом магния, который служит для анализа, является 26Mg (содержание в естественной смеси 11.01%). Получающийся в результате реакции 26Mg(n,)27Mg бета-радиоактивный изотоп 27Mg имеет период полураспада 9.458 минут. Он распадается на возбужденные состояния 27Al, которые сбрасывают энергию возбуждения эмиссией гамма-квантов (Рис.3). Гамма-кванты, которые служат для идентификации и количественного анализа имеют энергии E1 = 1.0144 МэВ и E2 = 0.8438 МэВ. Приблизительно 71% всех бета-распадов сопровождается испусканием гамма-квантов с энергией E1 и ~28% с энергией E2.

Рис.3. Получающийся в результате реакции 26Mg(n,)27Mg бета - радиоактивный изотоп 27Mg имеет период полураспада 9.458 минут.

Чувствительность нейтронно-активационного анализа непосредственно связана с величиной потока нейтронов, облучающих исследуемый объект (см. формулы (4) – (6)). В современном нейтронно-активационном анализе используются очень интенсивные потоки нейтронов, плотность которых достигает 1014 нейтронов на квадратный сантиметр в секунду. Это гарантирует высокую чувствительность метода: содержания многих элементов могут быть измерены с точностью до 10-9 грамм.

Высокая чувствительность позволяет анализировать с помощью нейтронов крайне малые образцы. Так, при изучении мономинеральных фракций лунных пород использовались образцы массой в несколько микрограмм. В то же время нейтронно-активационный анализ может проводиться без разрушения образца, что особенно ценно при исследовании уникальных объектов.

По сравнению с другими аналитическими методами в нейтронно-активационном анализе намного меньшее влияние так называемого «матричного эффекта». Это означает, что на определение примесных элементов практически не сказываются микроэлементы, составляющие основу вещества. Иными словами, нейтронно-активационному методу доступно измерение содержания микроэлементов в самых разнообразных материалах.

**Источники нейтронов.** В качестве источника нейтронов используются: радиоизотопные (ампульные) источники, ядерные реакторы и нейтронные генераторы.

В радиоизотопных источниках используются нейтроны спонтанного деления (252Cf) или реакции типа (,n) и (,n). Один миллиграмм 252Cf испускает 2.28·109 нейтронов в секунду с энергией 1.5 МэВ. Нейтронный источник, использующий реакции (,n), должен содержать альфа-источник и легкий изотоп (Li, Be, B) на котором происходит реакция (,n). Использование легких изотопов связана с тем, что энергия альфа-частиц должна быть больше высоты кулоновского барьера. В противном случае сечение реакции будет сильно подавлено. Например, в Pu/Be источнике используется смесь металлического порошка бериллия с небольшим количеством -излучателя - полония. Нейтроны образуются в реакции 9Be(,n)12C. В этом источнике получаются нейтроны, обладающие практически сплошным спектром энергий от 0 до 13 МэВ.

Источником нейтронов, основанным на фотоядерной реакции, является смесь радия и бериллия. В этом случае источник нейтронов представляет собой систему из двух запаянных ампул. Внутри ампулы с порошком бериллия помещается ампула с солями радия таким образом, что на бериллий действует только гамма-излучение, проходящее через стенки внутренней ампулы. Нейтроны образуются в реакции 9Ве(,n)8Ве. , Такой источник испускает монохроматические нейтроны с энергией 110 кэВ. Интенсивность радиоизотопных источников 106-108 нейтронов/c, а предел обнаружения элементов ~10-4-10-6%.

Ядерные реакторы являются мощными источниками нейтронов. Спектр нейтронов очень широк. В нем выделяют 3 компоненты - тепловые, эпитепловые (резонансные) и быстрые нейтроны (Рис.4).

Рис. 4. Типичный спектр нейтронов реактора

Тепловые нейтроны это нейтроны с энергией < 0.5 эВ. Они находятся в тепловом равновесии с атомами материала реактора. При комнатной температуре они имеют энергетическое распределение Максвелла-Больцмана со средней энергией 0.025 эВ и наиболее вероятной скоростью 2200 м/с. При облучении образцов, как правило, 90-95% нейтронного потока составляют тепловые нейтроны. Реактор мощностью 1 МВт обеспечивает нейтронный поток ~1013 (cм-2с-1). Предел обнаружения большинства элементов при использовании таких потоков составляет 10-5-10-10%.

Эпитермальные нейтроны имеют энергии в диапазоне от 0.5 эВ до ~0.5 МэВ. Их доля в реакторе ~2%. Кадмиевая пластинка толщиной 1 мм поглощает все тепловые нейтроны, но пропускает эпитепловые и быстрые нейтроны. Как тепловые, так и эпитепловые нейтроны вызывают в мишени реакции (n,). Доля быстрых нейтронов (> 0.5 МэВ) в реакторе составляет ~5%. Они вызывают реакции (n,p), (n,n') и (n,2n) и практически не вызывают реакции (n,).

Нейтронные генераторы - это ускорители, в которых нейтроны образуются в результате ядерных реакций на соответствующих мишенях. Чаще всего используются реакции

2H(d,n)3He, Q = 3.270 МэВ,

3H(d,n)4He, Q = 17.590 МэВ.

В результате этих реакций получаются нейтроны с энергиями ~2.5 МэВ и ~14.1 МэВ. Так как сечения этих реакций достаточно велики при небольших энергиях дейтронов, можно обойтись небольшими ускорителями. Максимум сечения реакции 3H(d,n)4He достигается при энергии Td 120 кэВ. Обычно используются каскадные генераторы. Типичный выход нейтронов у нейтронных генераторов ~1010 c-1. Использование быстрых нейтронов позволяет проводить анализ легких элементов (C, N, O), которые плохо активирующихся тепловыми нейтронами.

**Гамма-активационный анализ.** Гамма-активационный анализ основан на ядерных реакциях, при которых жесткие фотоны возбуждают реакции с выходом нейтронов и протонов. Среди большого числа методов элементного анализа гамма-активационный анализ выделяется большой селективностью и чувствительностью. Фотоядерные реакции позволяют активировать практически все элементы периодической системы с пределом обнаружения до 10-7%. Для гамма-активационного анализа используется тормозное излучение высокой интенсивности (1015 – 1015 квант/с), которое получают на электронных ускорителях. В качестве источника фотонов в настоящее время используется тормозное излучение электронов с энергиями 10—30 МэВ. Важной характеристикой источника фотонов, определяющей эффективность гамма-активационного анализа, является спектральная яркость излучения. Гамма-активационный анализ в частности позволяет эффективно анализировать такие элементы, как Ca, Ni, Ti, Tl и Pb. Преимуществом гамма-активационного анализа перед нейтронно-активационным анализом является также то, что гамма-кванты могут глубже проникать в образец, следовательно, анализу могут подвергаться образцы больших размеров.[1-3]

**Нейтронный активационный анализ на реакторе ибр-2 в Дубне в решении задач охраны окружающей среды и развитии новых технологий**

Инструментальный нейтронный активационный анализ в ЛНФ ОИЯИ в настоящее время используется в изучении воздушных загрязнений по координационной программе МАГАТЭ и проектам с рядом стран-участниц ОИЯИ. Биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов, проводимый с помощью мхов и лишайников с последующим применением ГИС технологий (географические информационные системы), позволяет создавать карты распределений элементов-загрязнителей на исследуемых территориях.

В секторе активационного анализа и радиационных исследований ЛНФ ОИЯИ выполнен цикл работ по Центральной России (север Московской области, Тверская, Ярославская и Тульская области) на Южном Урале (Челябинская область), Кольском полуострове (Хибины), на Украине (территории, прилежащие к Румынии), а также Болгарии, Польше, Румынии, Югославии, Словакии, Чехии и Южной Корее.

С помошью эпитеплового нейтронного активационного анализа была определена концентрация 42 элементов в образцах биомониторов как из загрязненных, так и из фоновых районов [6-8].

Анализ объектов окружающей среды (мониторинг рабочих мест и здоровье персонала, занятого в производстве фосфорных удобрений) с помощью ядерно-физических методов - НАА в комбинации с атомной абсорбцией и рентгено-флюоресцентным анализом - проводится в рамках координационной программы МАГАТЭ по оценке уровней загрязнения воздуха на рабочих местах и влияния на здоровье человека опасных производствах. Производство фосфорных удобрений связано с таким патологическим воздействием на здоровье персонала, занятого в его производстве, как флюорозы, заболевание органов дыхания и другие [9].

С помошью ядерно-физических методов анализа установлена корреляция между концентрациями элементов-загрязнителей в исходном промышленном сырье, отходах производства и ситуацией на рабочих местах. Это позволяет, в свою очередь, определить, как биосубстраты человека следуют уровню патологических изменений в организме вследствие техногенного воздействия окружающей среды. Стратегия мониторинга, развитая в России в этом проекте, предложена для распространения на сходных заводах по производству фосфорных удобрений в Узбекистане, Польше, Румынии в рамках Пятой программы COPERNICUS-1999 Европейского сообщества.

Применение НАА к анализу селен-, йод- и хром-содержащих фармацевтических препаратов на основе сине-зеленой водоросли Spirulina platensis, используемой в качестве матрицы, позволило отработать технологию производства этих препаратов и продемонстрировало большой потенциал Spirulina platensis. В исходной биомассе этой водоросли методом НАА впервые определено содержание 31 макро- микро- и следовых элементов (Na, Mg, Al, Cl, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni (используя (n,p) реакцию), As, Br, Zn, Rb, Mo, Ag, Sb, I, Ba, Sm, Tb, Tm, Hf, Ta, W, Au, Hg и Th). Изучено накопление селена, йода и хрома биомассой спирулины в зависимости от нагрузки питательно среды этими элементами [10, 11].

НАА на реакторе ИБР-2 в Дубне успешно применяется в изучении бактериального выщелачивания металлов и других элементов из обедненных руд [12].

Приведенные примеры наглядно демонстрируют практическое использование НАА в науках о жизни.

**ГЛАВА 2. ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОАКТИВАЦИОННОГО АНАЛИЗА**

Определение элементного и изотопного состава веществ и материалов является актуальной аналитической задачей, имеющей широкую область применения. Основными требованиями, предъявляемыми к выполнению аналитических работ в области исследования элементного и изотопного состава веществ, является высокая чувствительность, оперативность и качество анализов при их низкой себестоимости. Одним из наиболее универсальных и чувствительных методов определения элементного и изотопного состава веществ является нейтронно-активационный анализ (НАА).

Исследовательские ядерные реакторы широко используют в качестве источника нейтронов для проведения НАА. Одними из наиболее распространенных по количеству установок и их разнообразию является класс импульсные реакторов самогасящегося действия (ИРСД). В этом классе существует подкласс ядерных установок с предельными характеристиками нейтронного потока (порядка 1018 см-2с-1), используемых для проведения экспериментов, связанных с авариями реактивностного типа, изучением поведения материалов при облучении в интенсивном поле ионизирующих излучений и другими специализированными задачами. Использование подобных реакторов для выполнения НАА представляется целесообразным по причинам расширения области их применения и увеличения загруженности экспериментальными работами.

Перспективность работ, связанных с определением содержания благородных металлов и делящихся материалов в пробах различного характера (геологических, экологических и т.п.) определяется постоянным и устойчивым спросом на их проведение.

В зависимости от типа реакторной установки, ее нейтронно-физических и технических характеристик возникают различные возможности в облучении проб и проведении анализов. Для реализации этих возможностей требуется разработка специальных методов и технологий, наиболее полно отвечающих экспериментальной базе и содержанию аналитических задач. Процесс облучения материалов с помощью ИРСД отличается нелинейностью и скоротечностью. Кроме того, к качеству определения нейтронных характеристик в НАА предъявляются высокие требования - погрешность их выполнения не должна превышать 5%, чтобы не оказывать значительного влияния на результирующую ошибку анализов. Добиться выполнения указанного требования с помощью детекторов прямого измерения ионизирующего излучения не представляется возможным. Поэтому для определения характеристик нейтронного поля в ИРСД использовался метод активационных детекторов. К подготовке проб, содержащих драгоценные металлы, предъявляются особые требования. Это связано не только с потребностью в высокой чувствительности и качестве анализов, что характерно также и в случае определения делящихся материалов. Наличие больших неоднородностей состава, а также возможное присутствие самородных частиц обуславливают неординарные требования к представительности. Подготовленная к анализам проба должна иметь массу 50−100 г. В то время как для проб гомогенного состава эта величина обычно не превышает нескольких граммов и даже миллиграммов. В условиях облучения в интенсивных полях ионизирующих излучений специальные требования предъявляются ко всем используемым в ИРСД материалам. Сильный радиационный разогрев в условиях отсутствия принудительного охлаждения может привести к частичному или полному их разрушению.

Согласно действующим нормативным документам результаты определения содержания драгоценных металлов и делящихся материалов в пробах методом НАА с помощью ИРСД должны отвечать требованиям одной из перечисленных категорий: особо точный анализ, анализ рядовых проб, особо точный анализ геохимических проб.

Для выполнения анализов являются пригодными любой из традиционно используемых в активационных исследованиях методов: абсолютный, эталонов, мониторов. Кроме перечисленных, в работе предложено использовать сравнительный метод, являющийся компиляцией особенностей метода эталонов и мониторов и обеспечивающий наиболее высокое качество и производительность исследований. Согласно предложенному методу образцы сравнения, содержащие заданный набор определяемых элементов, облучаются совместно с пробой в одно время и в одном месте (иногда в качестве внутреннего монитора). Однако сам образец сравнения представляет собой самостоятельный объект, отделяемый от пробы. Определение активности компонент пробы проводится в ходе двух измерений: первое – измерение пробы, второе – измерение пробы совместно с образцом сравнения. Геометрия измерений выбирается таким образом, чтобы обеспечить ее идентичность условиям облучения.

Анализ облученного материала может быть выполнен с помощью одного из методов, обеспечивающих выполнение требований к качеству его проведения: радиометрическим, сцинтилляционным или гамма-спектрометрическим, а в случае делящихся материалов – по запаздывающим нейтронам, трекам деления и содержанию продуктов распада.

Важной особенностью нейтронно-активационного анализа благородных металлов и делящихся материалов, является разнообразие геометрических параметров проб и индикаторов нейтронного потока. В качестве индикаторов используются, как правило, фольги, и проволока. Для них характерна дисковая и линейная геометрия измерений. Пробы исследуемого материала, чаще всего имеют цилиндрическую форму. Геометрия сосуда Маринелли используется для предварительного анализа состава радионуклидов в пробе до облучения. Для качественного проведения анализов проб различной геометрии необходимо иметь образцовые материалы, повторяющие их геометрические и физические параметры и имеющие схожие радиационные свойства. Изготовление таких образцовых материалов и их аттестация являются длительным и трудоемким процессом, отнимающим значительные средства и время. Чтобы избежать этого, можно воспользоваться полуэмпирическим методом калибровки измерительной аппаратуры. Полуэмпирическая расчетная модель основывается на следующих двух основных принципах: приведении объемного детектора к точечному путем экспериментального определения его эффективного центра детектирования; приведение исследуемого образца к точечной геометрии, имеющей идентичную активность. Изменение геометрии источника компенсируется путем введения корректирующего геометрического параметра , учитывающего эквивалентность такого преобразования. Расчетные соотношения для определения источников излучения различной геометрии получены в работе.

Так как пробы геологических и экологических материалов имеют сложный элементный состав, то оценка пределов обнаружения в них благородных металлов и делящихся изотопов может быть выполнена только с учетом фонового излучения.

Для анализа содержания благородных металлов в пробах в работе предложено использовать метод инструментального НАА. Инструментальный анализ выполняется с помощью гамма-спектометрических измерений продуктов активации. На основании анализа нейтронно-физических характеристик разработан перечень изотопов благородных металлов, наиболее пригодных для НАА. Показано, что благородные металлы в основном не отличаются благоприятными характеристиками для его выполнения (за исключением золота и иридия). Другой важной особенностью является то, что НАА благородных металлов, за исключением родия, удобно проводить по сравнительно долгоживущим изотопам (период полураспада от 2,7 до 74,4 суток). Таким образом, в большинстве случаев, для выполнения анализов содержания благородных металлов не требуется создание специальных устройств быстрой доставки проб (пневмопочты и т.п.),

Сложности анализа делящихся материалов заключаются в том, что в пробах они находятся в смеси друг с другом, а в процессе деления образуют продукты распада одинаковые по изотопному составу и близкие по вероятности образования. Кроме того, процесс спонтанного деления тяжелых ядер в природе приводит к образованию дополнительного количества продуктов распада, что также увеличивает порог обнаружения делящихся нуклидов в пробах.

Наиболее важными характеристиками источника облучения являются поток нейтронов и потенциальная производительность облучения проб. При этом нейтронные характеристики источника имеют ключевое значение, так как определяют чувствительность анализов. Поэтому в качестве источника облучения в работе был выбран реактор ИГР, имеющий одновременно наибольший, среди рассмотренных ИРСД, флюенс нейтронов за время облучения и объем экспериментальных каналов. Наиболее близким к нему по перечисленным параметрам является реактор ИГРИК.

Для любых материалов, используемых в процессе облучения проб в ИРСД, существуют ограничения, характерные только для реакторов этого типа. Ограничения определяются двумя факторами: радиационным разогревом материалов в реакторе и повышенной радиационной безопасностью при обращении с ними после облучения.

При выполнении оценки степени радиационного разогрева были выбраны материалы, имеющие широкое применение в ядерных технологиях и потенциально пригодные для проведения НАА с помощью ИРСД. Возможная степень их радиационного разогрева в реакторе была оценена расчетным путем. Исходя из результатов расчетов повышения температуры материалов, был сделан вывод, что золото, кадмий и полиэтилен могут иметь существенные ограничения при их облучении в ИРСД, вызванные возможностью расплавления. Справедливость такого вывода была подтверждена в экспериментальных работах. Размягчение и плавление полиэтилена в реакторе ИГР наблюдается при интегральном флюенсе нейтронов (0,6−0,7)·1016 см-2. При отсутствии принудительного охлаждения и полном интеграле мощности реактора ИГР происходит не только плавление, но и частичное испарение индикаторов, выполненных на основе ядерно-чистого золота. По этой причине для нейтронно-физических исследований на реакторе ИГР в качестве нейтронных индикаторов были использованы такие материалы как медь, цинк и нихром, которые в силу своих ядерно-физических свойств гораздо менее подвержены радиационному разогреву. Кроме того, при флюенсе нейтронов порядка 0,5·1016 см-2 и более происходит плавление кадмиевой фольги. Таким образом, в ИРСД имеются ограничения по использованию метода “кадмиевой разности” для определения активации проб по трем группам нейтронов (тепловой, эпитепловой и быстрой).

В качестве материалов, пригодных для изготовления устройств размещения проб в реакторе и контейнеров для облучаемых материалов, были выбраны ядерно-чистый графит и полиэтилен, как наименее подверженные активации.

Большое значение для процесса активации исследуемых материалов имеют нейтронно-физические характеристики поля излучения в области размещения проб. Для реактора ИГР таким пространством является свободный объем экспериментальных каналов. Анализ спектральных характеристик поля нейтронов в экспериментальных каналах реактора, выполненный на основании экспериментальных и расчетных данных, позволил прийти к следующим заключениям:

* тепловая составляющая спектра нейтронов в экспериментальных каналах реактора ИГР не превышает 50%. Наличие существенной надтепловой и быстрой составляющих спектра нейтронов с энергией нейтронов свыше 3 МэВ указывает на возможность их активного использования для активации материалов проб. При этом может быть получена дополнительная информация об элементном составе исследуемых материалов, что в дальнейшем нашло свое подтверждение в экспериментальных работах;
* отличия спектров в центре и на периферии активной зоны реактора незначительны. Этот факт позволяет существенно снизить объемы работ, связанных с определением спектральных характеристик поля нейтронов во время облучения проб. Уменьшение объема работ достигается путем замены полномасштабных исследований спектра нейтронов по всему объему канала определением относительного распределения флюенса нейтронов по его высоте и спектральных характеристик в какой-либо одной контрольной точке.

В экспериментах по определению относительных величин распределения нейтронных потоков в реакторе ИГР (рисунки 1, 2) было установлено, что отличия в значениях нейтронных потоков по высоте экспериментальных каналов реактора не превышают 45%, а распределение нейтронного потока по радиусу экспериментальных каналов является равномерным с точностью до величины погрешности измерений (3%).

Отсутствие значительных неравномерностей в нейтронном потоке внутри экспериментальных каналов реактора ИГР является еще одной отличительной особенностью, упрощающей проведение НАА. Свойство равномерности потока значительно сокращает объем работ, связанных с определением спектра и флюенса нейтронов, упрощает и делает более точной всю процедуру активационного анализа.

Рисунок 1 − Вертикальное сечение реактора ИГР

Обозначения на рисунке 1

1 − кожух;

2 − экран боковой;

3 − отражатель;

4 − активная зона (неподвижная и подвижная части);

5 − канал ионизационной камеры;

6 − канал органов регулирования;

7 − боковой экспериментальный канал;

8 − центральный экспериментальный канал;

9 − канал физических измерений;

10 − канал термоэлектрического преобразователя;

11 − биологическая защита;

12 − бак с водой

13 − полость охлаждающей воды;

14 − перекрытие верхнее.

центр АЗ

Рисунок 2 − Распределение нейтронов по высоте каналов ИГР

Учитывая потенциальные значительные размеры проб, в работе была проведена их оптимизация по условиям облучения и измерений. На основании данных об элементном составе геологических материалов была проведена оценка сечения захвата ими нейтронов. В результате последующих вычислений было установлено, что толщина пробы не должна превышать 10 мм. Основным критерием для оптимизации диаметра проб являлась приемлемая (до 20% при выполнении рядовых анализов) величина абсолютной погрешности, возникающей при определении содержания элементов, имеющих неоднородные включения (например, частица самородного золота). Предварительная оценка оптимального диаметра проб была выполнена расчетным путем. Значение оптимального диаметра проб составило 50 мм. Для подтверждения правильности принимаемых решений были проделаны эксперименты с различными по размеру пробами, содержащими самородное золото. В ходе экспериментов был выполнен статистический анализ результатов определений в пробах самородного золота.[4, 5]

## Нейтронно-активационное определение эссенциально значимых микроэлементов в материнском молоке.

Оптимальным продуктом для питания детей раннего возраста является грудное молоко, что обусловлено сбалансированностью пищевых компонентов, в том числе и микроэлементов. Недостаток или избыток последних приводит к специфическим нарушениям развития или заболеваниям. В связи с этим нами было изучено содержание йода, селена, железа, цинка и марганца в грудном молоке разных периодов лактации, что в настоящее время является мало изученным вопросом. Выбор элементов определяется как их значимостью для организма, так и ожидаемой дефицитностью для региона.

Нейтронно-активационный анализ благодаря своей недеструктивности и высокой чувствительности наиболее оптимален для анализа таких объектов. Пробы перед облучением подвергались лиофильной сушке, аликвотные части взвешивались и упаковывались в кварцевые или полиэтиленовые ампулы, обеспечивающие герметичность при облучении. В качестве образцов сравнения были использованы злаковая травосмесь (СБМТ-02) и молоко сухое (IAEA, МАГАТЭ). При анализе по короткоживущим изотопам (йод, марганец) пробы облучались совместно с эталонами 20-30секунд, а по долгоживущим (цинк, железо, селен) пять часов в потоке тепловых нейтронов 5,0 · 1013 нейтр/см2сек .

Особенностью активационного анализа данных объектов является их интенсивный радиолиз в процессе облучения с возможным образованием летучих металлоорганических соединений, поэтому пробы перед вскрытием охлаждались жидким азотом. Содержимое ампул переносили в измерительные емкости, ампулы промывали этиловым спиртом, который объединяли с сухой частью пробы. Относительное среднеквадратическое отклонение для всех элементов в интервале определяемых концентраций не превышало 10-12%.

Полученные результаты позволяют выявить некоторые органические поражения в организме матери и наметить меры по предотвращению развития патологических изменений у ребенка.

**Нейтронно-активационное определение содержания золота и серебра в хвостах золотодобывающих предприятий.**

Нейтронно-активационный анализ широко применяется при определении содержания золота, серебра и других редких и благородных металлов в золотоносных рудах, где их содержание составляет от нескольких до десятков граммов на тонну. Для определения золота в основном применяется инструментальный вариант НАА. Однако, эксперименты показали, что в хвостах золотодобывающих промышленных объектов, где содержание золота составляет 0,07-0,1 г/т, а Na, S, Mn, Fe, Cu, As, Sb, и некоторых других - от нескольких сот граммов на тонну до 3-5 %, проведение инструментального НАА оказалось невозможным. Поэтому цель нашей работы - разработать методику определения золота и серебра в хвостах с их радиохимическим выделением. Основная сложность заключалась во вскрытии образца. Экспериментально установлено, что при его кипячении в смеси HCl:HNO3 (3:1) удается практически полностью перевести в раствор Au, Ag, As, Sb, Fe, а также Na, K, Cu, Sc и некоторые другие элементы. Исследование нерастворенного остатка показало, что химический выход золота и серебра в стадии растворения составляет почти 100 %.

Для селективного отделения золота можно использовать анионообменные смолы Dowex-1\_8 и АВ-17 из солянокислых и азотнокислых растворов, в которых коэффициент распределения золота больше 103. Однако в этих условиях невозможно селективно отделить серебро. По нашим данным, одностадийное селективное отделение аналитических радионуклидов золота и серебра от мешающих можно проводить в экстракционно-хроматографической системе ТБФ-1М HBr. Коэффициент распределения золота в ней составляет 3000, а серебра - 450, в то время, как коэффициенты распределения As, Fe, Sb и ряда других элементов < 1 и практически не сорбируются колонкой. Только In, Cd, Sn и Zn заметно сорбируются, однако их содержание достаточно низкое и не мешало определению Au и Ag. Полные химические выходы Au и Ag по стадиям растворения и разделения - 92-95 %.

Методика анализа: 0,05-0,07 г образца вместе с эталонами определяемых элементов облучали в вертикальном канале ВВР-СМ с плотностью потока нейтронов 1.1014 n.см-2.с-1 в течение 1-2 ч. Через день после облучения образец распаковывали, кипятили три раза в смеси HCl+HNO3 (3:1), каждый раз отделяя раствор декантацией. Полученные растворы объединяли и упаривали. Остаток растворяли в 5 мл

1 М HBr и переносили в колонку с ТБФ (диаметр колонки 0,5 см, высота слоя сорбента 4-5 см) и элюировали 20-25 мл 1М HBr. Сорбент переносили в полиэтиленовый флакон и измеряли на гамма-спектрометре.

По разработанной методике проведены анализы более 50 образцов для контроля содержания Au и Ag в исходном образце и разных фракциях после обработки СВЧ полем при разработке технологии увеличения извлекаемости золота и серебра из хвостов золотодобывающих промышленных объектов. Результаты анализов некоторых образцов, приведенных в таблице, показали, что основное содержание золота и серебра концентрируется в магнитной фракции (в 9 раз больше, чем в исходной), в то время, как в других фракциях оно уменьшается. [12]

**ГЛАВА 3. СОВРЕМЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

В настоящее время изделия отечественного ядерного приборостроения выполняются на уровне лучших зарубежных образцов, пользуются устойчивым спросом и служат для выполнения измерительных, контрольных и управляющих функций в атомной энергетике и атомной промышленности, в том числе для поиска, разведки и разработки месторождений радиоактивных минералов, контроля радиационно-опасных объектов, безопасности персонала и защиты окружающей среды. Широко используются приборы и измерительные системы для проведения научных исследований в экспериментальной ядерной физике, при исследовании и освоении космического пространства, в военной промышленности, медицине, сельском хозяйстве и многих других областях науки, техники и народного хозяйства. В соответствии с действующими стандартами, нормами и рекомендациями основным классификационным признаком технических средств ядерного приборостроения является измеряемый (контролируемый) радиационный параметр. По этому признаку различают:

- радиометры и радиометрические установки, предназначенные для измерения активности источника излучения или плотности потока частиц или квантов. К ним относятся:

- измерители плотности потока фотонов или частиц;

- измерители поверхностной активности радионуклидов;

- измерители объемной активности радиоактивного аэрозоля (паров);

- измерители объемной или удельной активности радионуклидов в жидкостях;

- измерители объемной активности радиоактивных газов;

- измерители объемной активности радионуклидов в воздухе;

- измерители удельной активности радионуклидов в твердых средах;

- измерители плотности

радиоактивного загрязнения почвы;

- дозиметры и дозиметрические системы, предназначенные для измерения энергии, переносимой излучением или передаваемой объекту. К ним относятся:

- измерители эквивалентной или поглощенной дозы;

- измерители мощности эквивалентной или поглощенной дозы;

- измерители потока или флюенса энергии ИИ.

Нейтронные генераторы для аппаратуры активационного анализа ИНГ – 013.

Импульсный нейтронный генератор на вакуумной трубке для аппаратуры активационного анализа.

Питание осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, 50 Гц.

Состоит из:

* излучателя нейтронов в составе блока трубки и блока коммутации;
* устройства питания и управления;
* комплекта соединительных кабелей длиной до 50 м.

**Технические характеристики ИНГ-013**

|  |  |
| --- | --- |
| Поток нейтронов, нейтрон/с | 1·1010 |
| Длительность нейтронного импульса, мкс | 0,8 |
| Частота, Гц | 1-100 |
| Ресурс, ч | 100 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 500 |
| Габаритные размеры излучателя нейтронов:- диаметр (мм) - длина (мм) |  1301000 |

ИНГ - 03; ИНГ – 031

Импульсные нейтронные генераторы на вакуумной трубке для аппаратуры активационного анализа

Состоят из:

* излучателя нейтронов в составе блока трубки и блока коммутации;
* устройства питания и управления;
* комплекта соединительных кабелей длиной до 50 м.

**Технические характеристики ИНГ-03; ИНГ-031**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | ИНГ-03 | ИНГ-031 |
| Поток нейтронов, нейтр/с | 1·109 | 3·1010 |
| Длительность нейтронного импульса, мкс | 0,8 | 0,8 |
| Частота, Гц | 1-15 | 1-100 |
| Ресурс, ч | 200 | 100 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 90 | 700 |
| Габаритные размеры излучателя нейтронов:- диаметр (мм)- длина (мм) |  130950 |

ИНГ – 07

Импульсный нейтронный генератор на газонаполненной трубке для аппаратуры активационного анализа

Состоит из:

* излучателя нейтронов;
* устройства питания;
* комплекта соединительных кабелей длиной до 50 м.

**Технические характеристики ИНГ-07**

|  |  |
| --- | --- |
| Поток нейтронов, нейтрон/с | 1·109 |
| Длительность нейтронного импульса, мкс | 20-100 |
| Частота, Гц | 100-10000 |
| Ресурс, ч | 500 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 200 |
| Габаритные размеры излучателя нейтронов- диаметр (мм) - длина (мм) |  190440 |

ИНГ – 17. Импульсный нейтронный генератор на газонаполненной трубке для аппаратуры активационного анализа

Состоит из:

* излучателя нейтронов;
* устройства питания;
* комплекта соединительных кабелей длиной до 50 м.

**Технические характеристики ИНГ-17**

|  |  |
| --- | --- |
| Поток нейтронов, нейтрон/с | 5·108 |
| Длительность нейтронного импульса, мкс | 20-100 |
| Частота, Гц | 400-10000 |
| Ресурс, ч | 500 |
| Питание | 220 В, 50 Гц |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 60 |
| Габаритные размеры излучателя нейтронов:- диаметр (мм) - длина (мм) |  70480 |

ИНГ – 27. Импульсный нейтронный генератор на газонаполненной трубке для аппаратуры активационного анализа

Нейтронный генератор ИНГ-27 - малогабаритный генератор нового поколения на основе отпаянной газонаполненной нейтронной трубки со встроенным многопиксельным детектором сопутствующих альфа-частиц. Предназначен для аппаратуры обнаружения и идентификации опасных веществ методом "меченых" нейтронов (метод нейтронного наносекундного анализа или API-метод).

Состоит из:

* излучателя нейтронов с альфа-детектором;
* устройства питания и управления;
* комплекта соединительных кабелей.

Дополнительно может комплектоваться электронными усилителями сигналов альфа-детектора.

|  |
| --- |
| Технические характеристики ИНГ-27 |
| Энергия нейтронов, МэВ | 14 |
| Нейтронный поток в 4π, нейтрон/с | 108 |
| Временное разрешение альфа-детектора, нс, не хуже | 1 |
| Количество пикселей альфа-детектора | 9 и более |
| Питание, В | 220 |
| Потребляемая мощность, Вт, не более | 40 |
| Ресурс работы, ч, не менее | 1000 |
| Габаритные размеры, мм:- моноблока излучателя нейтронов- блока питания и управления |  270x200x140200x300x120 |
| Масса, кг:- моноблока излучателя нейтронов- блока питания и управления |  83 |

**На основе генератора ИНГ-27 разрабатывается аппаратура дистанционного детектирования и идентификации взрывчатых и других опасных веществ.**

Генератор в выключенном состоянии безопасен.

Генератор предназначен для работы в составе автоматизированных аппаратурных комплексов, как стационарных, так и передвижных.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кузнецов Р.А., Активационный анализ, 2 изд., М., 1974. – 398 с.
2. Зайцев Е. И., Сотсков Ю. П„ Резников Р. С., Нейтронно-активационный анализ горных пород на редкие элементы, М., 1978. – 217 с.
3. Myминов В.А., Мухаммедов С., Ядернофизические методы анализа газов в конденсированных средах, Таш., 1977. – 302 с.
4. Азаров В.А., Силаев М.Е. Результаты определения элементного состава веществ, полученные методом нейтронного активационного анализа с использованием экспериментальной базы РГП НЯЦ РК // «Вестник НЯЦ». Атомная энергия и безопасность. − Вып.1. − 2003 − С.75-78.
5. Методика проведения нейтронно-активационного анализа геологических материалов. Методические указания. АК.65000.00.566 МИ; Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК; составитель: Силаев М.Е. − Семипалатинск-21. − 1997 − Инв. № К-35557.

6. Frontasyeva M.V., Steinnes E., Lyapunov S.M., Smirnov I.L. Biomonitoring of heavy metal deposition in South Ural region:Some preliminary obtained by nuclear and related techniques. J. Radioanal. Nucl. Chem., 2000, V. 245, No.2, P. 415-420.

7. LUCACIU A., FRONTASYEVA M.V.,.STEINNES E. Atmospheric deposition of heavy metals in Romania studied by the moss technique employing nuclear and related analytical techniques and GIS technology. J. Radioanal. Nucl. Chem., 1999, V. 240, No.2. P. 457-458.

1. FRONTASYEVA M.V., YERMAKOVA YE.V., STEINNES E., RAHN K.A. Study of trace elements in annual segments of moss biomonitors using epithermal neutron activation analysis: link with atmostheric aerosol. // Proceedings of NATO ARW «Man-Made Radionuclides and Heavy Metals in the Environment». (M.V.Frontasyeva, P.Vater and V.P.Peregygin–edts.) Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series. 2001, IV. Earth and Environmental Sciences – Vol. 5. P. 165-170.
2. Frontasyeva M.V.,.bunov A.V et al. Nuclear and Related Analytical Techniques Used for Workplace Monitoring and Occupational Health Studies// Preprint of JINR, E14-98-392, Dubna, 1998.
3. MOSULISHVILI L.M., KIRKESALI YE.I BELOKOBILSKY., A.I., KHIZANISHVILI A.I., FRONTASYEVA M.V., GUNDORINA S.F., OPREA C.D. Epithermal neutron activation analysis of blue-green algae Spirulina platensis as a matrix for selenium-containing pharmaceuticals / JINR Preprint E14-2000-225, Dubna, 2000; J. Radioanal. Nucl. Chem., 2002. V. 252. No.1.
4. MOSULISHVILI L.M., KIRKESALI YE.I., BELOKOBILSKY A.I., KHIZANISHVILI A.I., FRONTASYEVA M.V., PAVLOV S.S., GUNDORINA S.F. Nuclear analytical technique used to study the possibility of production of iodine-containing pharmaceuticals based on blue-green algae Spirulina platensis matrix for treatment and prophylactics // Particles and Nuclei, Letters, 2001, No. 4 [107]. P. 110-117 (in Russian).
5. TSERTSVADZE L.A.,.DZADZAMIA T.D, PETRIASHVILI SH.G., SHUTKERASHVILI D.G., KIRKESALI E.I., FRONTASYEVA M.V, PAVLOV S.S., GUNDORINA S.F. Proceedings of NATO ARW «Man-Made Radionuclides and Heavy Metals in the Environment». (M.V.Frontasyeva, P.Vater and V.P.Peregygin–edts.) Kluwer Academic Publishers // NATO Science Series. 2001, IV. Earth and Environmental Sciences – Vol. 5. P. 1245-257.
6. И.И.Садыков, М.М.Усманова, М.И.Салимов, З.О.Садыкова. Нейтронно-активационное определение содержания золота и серебра в хвостах золотодобывающих предприятий