

Нейтронный активационный изотопно-элементный анализ: становление, современное состояние, области применения и пути дальнейшего развития

Статья посвящена анализу развития и современного состояния изотопной индустрии и изотопно-элементного анализа. Указываются основные области применения стабильных и радиоактивных изотопов в народном хозяйстве и научных исследованиях, рассмотрены существующие методы активационного изотопно-элементного анализа сложных веществ, и подчеркивается уникальность активационного метода для осуществления изотопного анализа. Рассмотрены основные разновидности активационного анализа веществ и характерные примеры их практического применения. Отмечается постепенное, начиная с конца прошлого столетия, затухание интереса исследователей к применению и дальнейшему развитию активационного анализа и анализируются возможные причины этого. Предлагаются основные пути дальнейшего развития нейтронного активационного анализа (НАА), позволяющие реализовать его несомненные достоинства и заключающиеся в разработке общего подхода к многоэлементному НАА с созданием универсального компьютеризованного изотопно-элементного нейтронного активационного анализатора.

В.Э.Дрейзин

(Юго-Западный университет, г. Курск)

Ключевые слова:

изотопные технологии, активация вещества нейтронами, изотопно-элементный анализ.

Интерес к изотопам, их свойствам, методам разделения и производства возник в середине прошлого века в связи с разработкой ядерного оружия. Возникла необходимость отделения урана-235 от урана-238, добываемого из урановых руд, а также отделения изотопа плутоний-239, получаемого путем интенсивного облучения урана-238 нейтронами в ядерном реакторе, от урана и других трансурановых элементов, образующихся в ядерном реакторе. С появлением ядерной энергетики актуальность этих проблем возросла еще больше в связи с необходимостью производства ядерного топлива для АЭС. Разрабатывались различные технологии обогащения природного урана, состоящего в основном из изотопа ^{238}U , изотопом ^{235}U , которого в природном уране содержится примерно 0,7%, а для создания оружейного урана требовалось повысить его содержание до 90–95%. С появлением ядерной энергетики начали развиваться технологии производства ядерного топлива для АЭС, для которого тоже понадобилось обогащение урана изотопом ^{235}U , но существенно меньшей концентрации – до 2–5%.

В активной зоне ядерного реактора под воздействием интенсивного потока нейтронов, помимо изотопов урана и плутония, образуется множество других радиоактивных изотопов, и не только трансурановых, но и изотопов средних и легких элементов, образующихся как за счет вынужденного распада тяжелых элементов, так и за счет активации ядер атомов конструктивных элементов реактора, растворенных или находящихся в виде взвеси в теплоносителе (воде). И оказалось, что многие из этих искусственно получаемых, а также естественных изотопов, как стабильных, так и радиоактивных, обладают уникальными свойствами и могут найти широкое применение в различных отраслях народного хозяйства и в научных исследованиях. Прежде всего это

коснулось давно известного метода «меченых атомов», состоящего в замещении в природных или искусственных системах некоторых атомов их стабильными или радиоактивными изотопами, что позволяет проследить пути и динамику распределения этих атомов в этих системах. В *биологии* он позволяет исследовать процессы биосинтеза, обмена веществ, изучать структуры и функции сложных биологических молекул. В *медицине* – изучать динамику функционирования отдельных органов, осуществлять диагностику различных заболеваний, осуществлять радиоиммунный анализ, и т. д. В *экологии* – определять причины и масштабы загрязнения природных систем, исследовать глобальные пути переноса, накопления и динамики распада загрязняющих веществ в воде, воздухе и почвах. В *физике* – исследовать процессы кристаллизации веществ, структуру высокотемпературных сверхпроводников, тонких пленок, изучать диффузию примесей в полупроводниках и т. п. В *химии* – определять качественный и количественный состав веществ, их растворимость в воде и других растворителях, коэффициенты диффузии, изучать механизмы и кинетику различных химических реакций и т. д. Развивались и другие сферы использования стабильных и радиоактивных изотопов. В частности, и естественные, и искусственно получаемые в ядерных реакторах радиоактивные изотопы все более широко использовались в качестве источников ионизирующих излучений не только в атомной отрасли, но и во многих других отраслях народного хозяйства и научных исследований: в *биологии* – для индуцирования и исследования мутаций живых организмов; в *сельском хозяйстве* – для выведения новых сортов – более продуктивных, хорошо адаптированных к местным условиям и устойчивых к болезням растений, а также для борьбы с вредными насекомыми; в *медицине* – для лучевой терапии с внешним

облучением и брахитерапии (когда источник излучения вводится внутрь организма), включая внутритканевую брахитерапию (когда микроисточники радиации доставляются к определенным органам или тканям с помощью специальных радиофармпрепаратов), а также для радиационной стерилизации медицинского оборудования и инструментов; в *технике* – для использования в толщиномерх листовых материалов и пленок, измерителях уровня жидкостей, измерителях плотности и влажности сыпучих веществ, в гамма-дефектоскопах, светосоставах для светящихся шкал и т. д. Это послужило стимулом производства в промышленных масштабах стабильных и радиоактивных изотопов различных элементов как на специализированных, так и на энергетических ядерных реакторах.

Но помимо этих, уже устоявшихся, областей применения изотопов в последние два десятилетия с использованием новейших достижений в физике, электронике и вычислительной технике начали бурно развиваться новые области их применения, базирующиеся на их ядерно-физических свойствах. В том числе эффективно используются методы ядерного магнитного резонанса, ядерного гамма-резонанса, эффект Мессбауэра, на базе которых создана и все более широко применяется в физике, химии, биологии и медицине принципиально новая аналитическая и диагностическая аппаратура и соответствующие методы исследования: гамма-резонансная радиография (ЯГР), мессбауэровская спектрометрия, магниторезонансная томография (МРТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ). Наиболее динамично развивалось использование стабильных и радиоактивных изотопов в медицине, и к настоящему времени почти 50% всех производимых в мире изотопов используется в медицине.

Так зародилась и стала стремительно развиваться новая высокотехнологичная отрасль

экономики – производство и применение изотопов – как стабильных, так и радиоактивных. К настоящему времени она сформировалась как крупная высокотехнологичная отрасль народного хозяйства, развивающая производство и применение различных стабильных и радиоактивных изотопов в различных областях промышленности, сельского хозяйства, медицины и научных исследований. По производству как стабильных, так и радиоактивных изотопов Российская Федерация занимает одно из ведущих мест в мире, причем значительная их часть экспортируется в различные страны.

Развитие изотопной индустрии потребовало и развития методов разделения изотопов и изотопно-элементного анализа сложных веществ, что сопряжено с серьезными трудностями.

Изменение числа нейтронов в ядре атома любого элемента влияет на его свойства, но электронная структура атома остается той же, а потому химические свойства изотопов одного и того же элемента мало отличаются, что затрудняет их разделение. Однако ядерно-физические характеристики изотопов одного и того же элемента различаются весьма существенно.

Существующие методы разделения изотопов базируются на небольших различиях их физико-химических свойств. Поэтому они весьма сложны, многостадийны и требуют использования сложного технологического оборудования, что определяет их низкую производительность и дороговизну.

Не менее сложны методы изотопно-элементного анализа сложных веществ. Химические методы анализа состава сложных веществ не различают изотопов одного и того же элемента из-за идентичности их химических свойств. Существующие физические методы элементного анализа веществ и материалов, базирующиеся на различных модификациях спектрального

анализа в различных диапазонах фотонного излучения возбужденных атомов и молекул анализируемого вещества (инфракрасном, видимом, ультрафиолетовом и рентгеновском), могут различать изотопы лишь легких элементов с атомным весом не выше 20–30 а.е.м., где относительная разница масс различных изотопов достаточно велика. Для этого проба анализируемого вещества должна быть переведена в газообразное (парообразное) состояние, что осуществляется с помощью электрической дуги, достаточно мощного лазерного излучения, электронного или ионного сфокусированного пучка достаточно высокой энергии. При этом атомы анализируемого вещества ионизируются и возбуждаются. Возбуждение снимается путем характеристического фотонного излучения, энергетический спектр которого индивидуален для каждого химического элемента. Хотя масса ядра оказывает некоторое влияние на спектры этого излучения (происходит небольшой сдвиг спектральных линий), но уже для элементов со средними атомными весами разрешения оптических спектрометров недостаточно для различения изотопов этих элементов (сдвиг линий получается меньше, чем их ширина). Поэтому для изотопного анализа сложных веществ эти методы практически не используются.

Более эффективным является масс-спектрометрический метод, основанный на воздействии преобразованного в парообразное ионизированное состояние пробы анализируемого вещества скрещенными электрическим и магнитным полями, под действием которых возникает их циклотронное вращение вокруг магнитных силовых линий, радиус которого зависит от массы иона. Но этот метод требует предварительной химической очистки пробы, чтобы в ней оставались лишь изотопы одного элемента, а само разделение изотопов должно происходить в вакуумной камере. Химическая очистка пробы необходима, поскольку метод

не позволяет отдельно идентифицировать изотопы различных элементов с одинаковым массовым числом (а таких изотопов – изобаров – достаточно много).

Таким образом, в изотопном анализе активационный метод практически не имеет конкурентов.

Становление и развитие нейтронного активационного анализа

Поскольку химические и физические свойства изотопов стабильных элементов различаются очень слабо, но их радиоактивные изотопы легко различить по излучаемым в процессе их распада ядерным частицам и их энергиям, то, естественно, появилась идея изотопного анализа веществ путем превращения стабильных изотопов в радиоактивные, воздействуя на них высокоэнергичным ядерным излучением. Уже в 1936 г. венгерские химики Хевеши и Леви впервые применили нейтронное облучение для элементного анализа. Облучая нейтронами, излучаемыми радий-бериллиевым источником, редкоземельные элементы, они разработали метод определения содержания диспрозия в составе иттрия. Но реальная возможность использования активационного анализа различных веществ появилась в 40-е гг. с появлением ядерных реакторов, позволяющих получать мощные потоки нейтронов, когда началась эпопея по созданию ядерного оружия в Германии, США и Англии, в которую после окончания второй мировой войны включился и Советский Союз. В первую очередь исследовалась возможность разделения и изотопного анализа радиоактивных изотопов урана и плутония, используемых в ядерном оружии. Но, хотя идея активационного анализа уже была известна и появились достаточно многочисленные исследовательские ядерные реакторы, в каналах которых можно было облучать любое вещество, реальное развитие и применение нейтронного активационного

анализа (НАА) началось лишь в 50-е гг., причем, в первую очередь, это потребовалось для самой ядерной индустрии. Для строительства реакторов потребовались материалы с малым содержанием примесей элементов, сильно поглощающих нейтроны, и одним из эффективных методов обнаружения и определения концентрации таких примесей стал активационный анализ.

Вначале явно преобладал радиохимический подход. Он состоит в разложении активированной пробы анализируемого вещества различными физико-химическими методами на составляющие химические элементы. Это было связано с тем, что для анализа образовавшихся при активации радиоизотопов использовались радиометрические методы измерения наведенного излучения (в основном, с использованием газоразрядных детекторов – счетчиков Гейгера и Гейгера-Мюллера), которые не позволяли определять энергию детектируемых частиц, и, соответственно, при анализе смеси радиоизотопов не удавалось достичь необходимой селективности. Но радиохимическое разделение элементов требует трудоемких и длительных операций радиохимической очистки. В ранних работах для этого использовался трудоемкий и длительный метод осаждения, что делало невозможным использование короткоживущих радиоизотопов, поскольку за время транспортировки облученной пробы из ядерного реактора до аналитической аппаратуры короткоживущие радиоизотопы успевали полностью распасться. Поэтому в ранних работах использовались только радиоизотопы с периодом полураспада более 1 часа. Лишь позже начали использовать более быстрые методы разделения элементов, такие как экстракция, ионообменная хроматография и другие, которые позволили ускорить разделение элементов до нескольких минут. Тем не менее, радиохимический метод активационного анализа остается весьма трудоемким, низкопроиз-

водительным и дорогим методом, требующим высококвалифицированного персонала. Лишь в 60-х гг. с появлением доступных сцинтилляционных спектрометров он начал постепенно вытесняться инструментальным методом, который базируется на определении ядерно-физических свойств, образующихся при активации радиоизотопов путем исследования энергетических спектров их излучений. Поскольку при таком анализе не нарушается физическая целостность пробы, этот метод называют инструментальным и неразрушающим.

Вначале использовались сцинтилляционные гамма-спектрометры с невысоким энергетическим разрешением, что опять же требовало предварительной химической очистки пробы от нецелевых элементов и примесей. Значительное развитие инструментальный подход получил с появлением гамма-спектрометров высокого разрешения на основе полупроводниковых германиевых детекторов, энергетическое разрешение которых на порядок превышало разрешение традиционных сцинтилляционных детекторов. Правда, эти детекторы требовали охлаждения до криогенных температур жидким азотом, но зато удалось повысить избирательность многоэлементного анализа образовавшихся при активации радиоизотопов. К этому времени начала быстро развиваться электронная микросхемотехника. Появились быстродействующие микроэлектронные аналого-цифровые преобразователи и контроллеры, и началось массовое внедрение персональных компьютеров. Все это резко повысило возможности инструментального метода нейтронного активационного анализа.

Одной из первых монографий по активационному анализу является работа [1], появившаяся в 1960 г. В СССР первые монографии по активационному анализу появились на 5–10 лет позже [2-4]. В это же время появляются тематические сборники статей и материалы конференций по активационному анализу [5-8].

щихся при облучении, пропорционально содержанию исследуемого элемента, находят требуемое значение (при использовании серии эталонов определение содержания целевого изотопа в исследуемом образце обычно ведут по калибровочной кривой зависимости активности от содержания анализируемого элемента, для определения которой изготавливают несколько эталонных образцов с различным содержанием определяемого изотопа). Поскольку определяемый элемент в исследуемом образце и эталоне активируется в одинаковых условиях при равенстве длительностей измерений, соотношение активностей определяемого элемента в пробе и эталоне будет равно соотношению содержаний элемента. Это устраняет те сложности, которые присущи абсолютному методу и, естественно, повышает точность и чувствительность анализа. Очевидно, что в случае метода эталонов нет необходимости точно знать плотность потока активирующего излучения, отпадает также требование к постоянству интенсивности активирующего излучения во времени, устраняются неопределенности, связанные с определением макроскопических сечений ядерных реакций при недостоверно известном спектре потока нейтронов.

Но, если необходимо определить в образце содержание нескольких элементов, то необходимо для каждого из них изготавливать свою серию эталонов с различным и точно известным содержанием данного элемента в образце. По всем остальным характеристикам эталоны должны быть идентичны анализируемому образцу. Изготовление эталонов представляет достаточно сложную и весьма трудоемкую технологическую задачу и занимает много времени. Поэтому применение относительного метода оправдано, когда требуется проводить множество однотипных анализов. В этих случаях целевыми остаются одни и те же элементы. Один раз подготовив для них эталонные

образцы, можно их использовать многократно (но, конечно, при повторном их использовании необходимо обеспечить полный распад образовавшихся в них при предыдущем использовании радиоизотопов). Именно для таких случаев разрабатывались автоматизированные установки для проведения активационного нейтронного анализа [13].

Но даже с использованием эталонных образцов при образовании дополнительных радиоизотопов от содержащихся в образце посторонних элементов (элементов-носителей, с которыми целевой элемент состоит в химической связи, и примесных элементов) не всегда удается четко выделить целевой изотоп, и до середины 70-х гг. преимущественно использовался активационный анализ с радиохимическим разделением образовавшихся радиоизотопов. Это часто обеспечивало более высокие значения чувствительности и точности, чем в случае инструментального подхода.

Из публикаций тех лет следует, что, во-первых, рассматривался только элементный анализ, при котором достаточно определить содержание любого изотопа целевого элемента, а содержание всего элемента (суммы всех его изотопов) в пробе определялось по известному относительному содержанию всех изотопов в природном элементе, т. е. задача изотопного анализа не ставилась, а во-вторых, практически, для определения каждого элемента (в лучшем случае двух–трех элементов) разрабатывалась своя методика активационного анализа. Если же необходимо было проводить многократные повторные анализы (например, для определения содержания целевого элемента на обогатительных фабриках), то разрабатывались специализированные (и весьма дорогие) установки для проведения этих анализов. Причем чаще всего разрабатываемые методики были ориентированы на проведение активации в ядерном реакторе и измерение излучения образовавшихся радиоизотопов

с использованием радиометрической аппаратуры, а создаваемые установки использовали радиоизотопные источники нейтронов (преимущественно полоний-бериллиевые, или радий-бериллиевые), обеспечивающие достаточно сильный поток нейтронов. Например, в [4] описана методика анализа горных пород на алюминий и кремний. Алюминий и кремний являются основными породообразующими элементами осадочных пород, поэтому задача их анализа в горных породах является актуальной. Методика их активационного анализа с использованием радиоизотопного полоний-бериллиевого источника нейтронов базировалась на использовании реакций $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ и $^{28}\text{Si}(n,p)^{28}\text{Al}$, т. е. при активации оба эти элемента превращаются в один и тот же радиоизотоп ^{28}Al . Такие реакции, приводящие к одинаковому радиоизотопу, называют интерферирующими. Для их разделения использовался тот факт, что первая реакция идет на тепловых нейтронах, а вторая на быстрых с порогом 3,9 МэВ. Для раздельного определения этих элементов проба облучается дважды: один раз полным спектром нейтронов, а второй раз при помещении пробы в кадмиевый экран, который поглощает тепловые нейтроны. Концентрации элементов определяются сопоставлением полученных значений активности с активностями эталонов с известным содержанием этих элементов. Учитывая массовость проведения подобных анализов, для повышения их производительности была разработана установка «Нейтрон-2». На ней была отработана методика активационного анализа не только алюминия и кремния, но и фтора [14,15].

В [16] описана методика определения изотопов натрия и калия. Оба эти изотопа определяются по реакциям (n,γ) : $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$, $^{41}\text{K}(n,\gamma)^{42}\text{K}$, протекающим от тепловых нейтронов. Методика предусматривает два этапа облучения. После первого облучения регист-

рируется гамма-излучение, после второго – бета-излучение. Гамма-излучение регистрируется с помощью сцинтилляционного детектора, бета-излучение – с помощью торцевых газоразрядных счетчиков. Одновременно с образцом активируются эталоны натрия и калия с известным содержанием этих элементов.

Периоды полураспадов: ^{24}Na – 15,05 ч, ^{42}K – 12,36 ч. С учетом этого, облучение должно проводиться в течение 2,5–5 часов, пауза 10–15 часов, измерение 1–2 часа. Как видим, в этом случае спектрометры вообще не использовались.

Большое внимание уделялось исследованию возможностей использования активационного анализа для элементного анализа нефти и нефтепродуктов. Различные сорта нефти содержат в разных пропорциях углерод, водород, кислород, серу и азот: углерод 83–87%, водород 11,4–14,4%, кислород 0,004–4,2%, сера 0,1–3%, азот 0,07–1%. Но водород под действием нейтронов не дает радиоактивных изотопов, а реакции на углероде, вызванные нейтронами, имеют очень малое сечение, поэтому на практике активационный метод для определения водорода и углерода в нефти не применяется. Исследовалась возможность применения активационного метода для определения в нефти серы по реакции $^{34}\text{S}(n,p)^{34}\text{P}$, идущей на быстрых нейтронах [17], а также металлов и редкоземельных элементов, которые могут содержаться в различных сортах нефти в количестве от 10^{-4} до 10^{-8} г/г [18–20], но при этом использовался радиохимический метод разделения радиоизотопов. Более того, предпринимались многочисленные попытки применить активационный анализ для каротажа нефтяных и газовых скважин как разведочных, так и промысловых, а также каротажа разведочных скважин на месторождениях различных полезных ископаемых. При этом в качестве источника нейтронов применялись ампульные радиоизотопные источники

(преимущественно полоний-бериллиевые и радий-бериллиевые), а в качестве измерительной аппаратуры – сцинтилляционные гамма-спектрометры. Чтобы уменьшить влияние сильных потоков гамма-излучения от радиоизотопных источников, их приходилось размещать в погружаемом в скважину зонде на расстоянии нескольких метров от детекторов спектрометров, а для обеспечения возможности измерения спектров активированных радиоизотопов с коротким периодом полураспада накладывались определенные ограничения на скорость перемещения зонда в скважине.

Однако условия проведения нейтронного активационного анализа в скважинах существенно сложнее, чем в лаборатории. Помимо указанной необходимости пространственного отделения активации от измерений и конструктивных трудностей встраивания аппаратуры в спускаемый в скважину зонд, приходится учитывать более сильный и разнообразный радиационный фон в скважине, искажение спектров нейтронного и гамма-излучения за счет рассеяния в окружающей породе и затрубном пространстве, особенно в обсадных скважинах, укрепленных достаточно толстостенной стальной трубой, при этом отсутствует возможность химического разделения и очистки определяемых элементов от многочисленных сопутствующих. Все это затрудняет решение практических задач нейтронным активационным анализом в скважинах. Поэтому по активационному каротажу нефтегазовых скважин достигнутые результаты весьма скромны. В лучшем случае удавалось определять степень обводненности нефтяных скважин, границу между нефтью и пластовыми водами, причем вода определялась не по водороду и кислороду, а по растворенным в ней натрию и хлору (NaCl), поскольку пластовые воды достаточно сильно минерализованы [21-25].

Важным шагом в развитии НАА явилось появление малогабаритных и относительно

недорогих и удобных в эксплуатации (по сравнению с ядерными реакторами) промышленных нейтронных генераторов. Они, конечно, не позволяют достичь столь же мощных потоков нейтронов как в ядерных реакторах (хотя вполне сопоставимы с потоками от ампульных радиоизотопных источников), но зато являются более радиационно безопасными, т. к. при отключении электропитания генерация нейтронов полностью прекращается, а главное – они генерируют практически моноэнергетические нейтроны с энергией 2,5 или 14 МэВ, что позволяет точно определять сечения соответствующих ядерных реакций, а значит уменьшить неопределенность результатов анализа при использовании абсолютного метода.

Однако несмотря на возросшие технические возможности как за счет появления промышленных нейтронных генераторов, так и за счет огромного прогресса в микроэлектронике, вычислительной технике и сложных методах обработки больших массивов информации, реализуемых в виде специализированных пакетов программ, следует констатировать существенное угасание интереса к дальнейшему развитию и применению НАА, уже начиная с 90-х гг. прошлого столетия. И далее уже в текущем столетии в РФ резко падает количество публикаций по НАА (за это время не вышло ни одной новой монографии, резко уменьшилось число журнальных публикаций). Более того, данная тематика исчезла из работ тех академических и других научных институтов и исследовательских центров, которые активно занимались ее разработкой в 60-е, 70-е и 80-е гг. То же происходит и за рубежом. Из наиболее значимых работ последних лет по НАА следует указать разработку «Справочно-информационной интерактивной системы (СИИС) ядерно-физических констант для нейтронного активационного анализа (НАА)», выполненную в ФЭИ (г. Обнинск). Описание ее можно найти в статье [23]. В ней современные

оцененные ядерно-физические данные (ЯФД) объединены с программным комплексом, позволяющим выполнить расчеты концентрации веществ при различных видах НАА, анализировать точность измерений, учитывать интерферирующие реакции, оптимизировать условия экспериментов. В случае применения абсолютного метода в задачах активационного анализа, точность измерений в основном определяется точностью определения ЯФД. Поэтому при создании СИИС оценке ЯФД было уделено особое внимание. Тем не менее, и в этом случае оставался прежний подход к выполнению НАА, для анализа каждого элемента должна была разрабатываться своя методика выполнения НАА. Система лишь облегчала нахождение необходимых ЯФД для определяемых элементов, целевых и интерферирующих реакций и выполнения расчетов для определения концентрации целевого изотопа в анализируемом образце по измеренной удельной активности этого изотопа с примерным определением погрешности ее определения из-за влияния интерферирующих реакций.

Предлагаемое направление дальнейшего развития НАА

Хотя наблюдается явное угасание интереса к дальнейшему развитию активационного анализа, но его потенциальные возможности отнюдь не исчерпаны. Действительно, НАА может выполнять неразрушающий анализ твердых тел, жидкостей, суспензий, растворов при минимальной подготовке анализируемых образцов. По предельной чувствительности (при использовании относительного метода с изготовлением эталонных образцов) НАА превосходит остальные методы элементного анализа. Так, если чувствительность атомно-эмиссионного, атомно-абсорбционного и масс-спектральных методов составляет $10^{-3} - 10^{-7} \%$, то нейтронно-активационного $10^{-5} - 10^{-9} \%$ (в зависимости от определяемого элемента).

При этом следует отметить, что использование всех методов, кроме НАА (особенно при определении малых концентраций целевых элементов в пробе анализируемого вещества) требует проведения «холостого» опыта, ограничивающего чувствительность метода. Дело в том, что во всех неактивационных методах предъявляются жесткие требования к чистоте используемых реактивов, посуды, приборов и самих помещений. В противном случае под внешним воздействием возможно загрязнение проб широко распространенными элементами, такими, как Na, Al, Fe, Cu, Zn и др. Поэтому при использовании неактивационных методов наряду с основными измерениями проводятся контрольный («холостой») опыт, когда все те же операции проводятся без участия исследуемой пробы и полученный результат вычитается от результата, полученного с пробой. Отсюда понятно, что этими методами нельзя определять содержания элемента с концентрациями меньшими, чем дает «холостой» опыт. В НАА «холостой» опыт не нужен, т. к. загрязнения элементами, не совпадающими с целевыми элементами анализа, не влияют на результаты анализа. Это позволило использовать НАА для определения следовых количеств примеси в материалах, используемых в реакторо- и ракетостроении (например, определять до $10^{-4} \%$ гафния в циркониевых сплавах, используемых для изготовления оболочек ТВЭЛов), применять его в полупроводниковой технологии (для определения микроколичеств до $10^{-10} - 10^{-11}$ г/г мышьяка в германиевых кристаллах, примеси которого должны быть строго ограничены).

НАА пригоден для определения таких редких элементов, как золото при содержании до $10^{-9} - 10^{-10} \%$ и платина (до $10^{-5} - 10^{-6} \%$).

По точности НАА с использованием эталонных образцов не уступает другим методам элементного анализа, а в ряде случаев и превосходит их. Но основное его достоинство –

возможность определять не только элементы, но и их изотопы. Из всех конкурирующих методов им обладает лишь масс-спектрометрический, но и то ограниченно (он не различает изобары – изотопы разных элементов с одинаковым массовым числом). Это достоинство особенно важно в связи с бурным развитием в последние десятилетия изотопных технологий, применяемых не только в ядерной энергетике и оборонных технологиях, но и в медицине, биологии, материаловедении и многих других отраслях, поскольку другие указанные методы его заменить не могут.

Таким образом, снижение популярности НАА связано, на наш взгляд, не с малой доступностью и сложностью необходимого для его реализации оборудования, а с ущербностью используемого подхода к его применению, когда для каждой конкретной практической задачи (контроля того или иного элемента или их группы) разрабатывалась своя индивидуальная методика активационного анализа, для реализации которой зачастую необходимо было разрабатывать свои технические средства, методы обработки получаемой информации и ее интерпретации.

Очевидно, реанимация этого перспективного метода должна заключаться, во-первых, в концентрировании основного внимания на задачах контроля не элементного, а изотопно-элементного анализа, что исключительно важно для дальнейшего развития изотопных технологий, и, во-вторых, в выработке универсального подхода к решению практических задач НАА и разработке универсальных технических средств для проведения такого анализа, как это имеет место в других физических методах элементного и физико-химического анализа: оптических спектральных методов, метода рентгеноструктурного анализа, метода электронной микроскопии и других. Технические предпосылки для этого вполне созрели.

В следующих статьях серии рассмотрен такой подход с описанием общей методики многоэлементного НАА с упором именно на изотопный анализ, а также предлагается концептуальное решение автоматизированного универсального изотопно-элементного анализатора.

Литература

1. W. Meinke, «Activation analysis utilizing fast radiochemical separations». In: *Radioisotopes in the Physical Sciences and Industry*. IAEA, Vienna, 1960, vol. 2, p. 277.
2. Кузнецов Р.А. Активационный анализ. М.: Атомиздат, 1967.
3. Маслов И.А., Лукницкий Н.А. Справочник по нейтронному активационному анализу. 1971. 320 с.
4. Бланков Е.Б., Бланкова Т.Н., Русяев В.Г., Якубсон К.И. Нейтронный активационный анализ в геологии и геофизике. М.: Наука, 1972. 321 с.
5. Активационный анализ горных пород и других объектов. Ташкент: ФАН, Узб. ССР, 1966.
6. Активационный анализ элементного состава геологических объектов. Ташкент, ФАН, Узб. ССР, 1967.
7. Ядерно-геофизические методы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1970.
8. Методы ядерной геофизики при изучении газонасыщенности и элементного состава горных пород. М.: Недра, 1972.
9. Кузнецов Р.А. Активационный анализ. Изд. 2-е переработанное и дополненное. М.: Атомиздат, 1974. 344 с.
10. Бекман И.Н. Ядерные технологии: учебник для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 500 с.

11. Райли Д., Энскин Н. и др. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. Часть 1 (перевод с англ.). 2000. 437 с.
12. G. Seaborg, J. Levingood. J. Amer. *Artificial radioactivity as a test for minute traces of elements*. Chem. Soc., 1938, vol. 60, p. 1784.
13. Штань А.С. Аппаратурно-инструментальная база активационного анализа в СССР // Атомная энергия, Том 33, вып. 4. 1972. С. 858-861.
14. Вязников Е.П., Глассон В.В. Повышение эффективности нейтронного активационного анализа минерального сырья. В кн.: Материалы IX совещания работников геологических организаций. Вып. 4. Изд-во ВНИИминсырья. 1965.
15. Вязников Е.П., Глассон В.В. Определение фтора в образцах горных пород методом нейтронной активации. В кн.: Ядерно-геофизические методы. Новосибирск: Наука, Сиб. отд. 1970.
16. Лейпунская Д.И., Путятин Н.Д. Экспрессное определение методом нейтронного активационного анализа содержания натрия и калия в малых порошковых пробах алюмосиликатных пород. В кн.: Труды 1 Всесоюзного координационного совещания по активационному анализу. Ташкент: Наука, Узб. ССР. 1964.
17. Ляст И.Ц., Дробиз А.М., Хачатуров Ю.Г. Радиометрическое определение серы. М.: Химия, 1968.
18. P.A. Idding, «Application of activation analysis in the petroleum and chemical industries. Analysis Instrumentation», N. У. *Plenum Press*, 1964.
19. V.P. Guinn, «Activation analysis in the petroleum and chemical industry. Activation analysis, principles and applications», N. У. *Acad. Press*, 1965.
20. U. Colombo, G. Sironi. «Systematic neutron activation technique for the determination of trace metals in petroleum», *Analyt. Chem.*, 1964, 36, № 4.
21. Аксельрод С.М., Путкарадзе Л.А. Применение радиоактивных методов исследования скважин в нефтяной промышленности Азербайджанской ССР. В кн.: Ядерная геофизика при поисках полезных ископаемых. М.: Гостоптехиздат, 1960.
22. Алексеев Ф.А., Одинокое В.П., Шимелевич Ю.С. Активационный анализ горных пород в условиях скважины и его использование для определения местоположения нефтеносных и водоносных пластов. В кн.: Ядерная геофизика. М.: Гостоптехиздат, 1959.
23. Бланков Е.Б., Бланкова Т.Н. Контроль за обводнением нефтеносных месторождений Татарии. В кн.: Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР. Т. 4. М.: Гостоптехиздат, 1961.
24. Бланкова Т.Н. Возможности метода наведенной активности натрия при разделении нефтеносных и водоносных коллекторов в карбонатных отложениях // Татарская нефть. 1960. М 7.
25. Фельдман В.Е., Цлав Л.З. Определение местоположения контактной зоны нефтеносных и водоносных карбонатных пластов методом наведенной активности. В кн.: Радиоактивные изотопы в народном хозяйстве СССР. Т. 4. М.: Гостоптехиздат, 1961.

Neutron Activation Isotope Element Analysis: Formation, Current State, Fields of Application and Ways of Further Development

Dreyzin Valeriy (Southwestern State University, Kursk, Russia)

Abstract. The article is devoted to the analysis of the development and current state of the isotope industry and isotope element analysis. The main areas of application of stable and radioactive isotopes in the national economy and scientific research are indicated, the existing methods of activation isotope-element analysis of complex substances are considered, and the uniqueness of the activation method for isotope analysis is emphasized. The main types of activation analysis of substances and typical examples of their practical application are considered. The gradual fading of researchers' interest in the application and further development of activation analysis has been noted since the end of the last century, and possible reasons for this are analyzed. The main ways of further development of neutron activation analysis (NAA) are proposed, which make it possible to realize its undoubted advantages and consist in developing a common approach to multi-element NAA with the creation of a universal computerized isotope-element neutron activation analyzer.

Keywords: *isotope technologies, neutron activation of matter, isotope element analysis.*

В.Э.Дрейзин (профессор, д.т.н., директор) – Юго-Западный университет, г. Курск

Контакты: +7 (4712) 51-00-89, drejzin-ve@yandex.ru