

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЙОДА В УГЛЕРОДЕ, ОСНОВАННЫХ НА РЕГИСТРАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.П. Омельник, В.В. Левенец, А.Ю. Лонин, А.А. Щур

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: levenets@kipt.kharkov.ua

Проведено исследование возможностей рентгенорадиометрического, рентгенофлуоресцентного и рентгеноспектрального с ионным возбуждением методов определения содержания йода в углеводе. Приведены аналитические и технические характеристики экспериментальных установок элементного анализа, использующих эти методы. Предложены способы улучшения рассмотренных характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной генерации в Украине предусматривает дальнейшее повышение безопасности действующих АЭС. Система вентиляции и газоочистки, в состав которых входят йодные фильтры на основе углевода, предотвращающие выброс радиоактивных загрязнений в воздушную среду, остаётся одним из основных факторов, определяющих экологическую и радиационную безопасность при эксплуатации ядерных энергоблоков. Разработки фильтров с улучшенными характеристиками, а также методов контроля и прогнозирования работоспособности йодных фильтров для АЭС требуют наличия методики для определения содержания йода в углеводе. Методика в большинстве случаев при решении таких задач должна: обладать высокой точностью, чувствительностью, надёжностью результатов анализа; быть экспрессной; не требовать предварительной обработки проб перед инструментальным определением; не требовать для выполнения сложной и дорогостоящей аппаратуры.

В настоящее время разработано значительное количество методов определения содержания йода в различных объектах окружающей среды: в пищевых продуктах и продовольственном сырье; биологических тканях; воде и почве и др. [1–5]. При определении радиоактивных изотопов йода часто используют радиометрию, нейтронно-активационный анализ, масс-спектрометрию [6–9]. Однако они не всегда применимы при решении указанной задачи или не удовлетворяют какому-либо из вышеперечисленных требований [10]. При решении задачи высокочувствительного определения содержания йода в углеводе предпочтительным является использование методов элементного анализа, основанных на регистрации характеристического рентгеновского излучения (х.р.и.) из элементов анализируемого объекта [11–13]. Важным достоинством этих методов является то, что в большинстве случаев их применения имеется возможность проводить многоэлементный, неразрушающий, не требующий пробоподготовки экспрессный анализ.

Целью данной работы является экспериментальное исследование аналитических и технических

характеристик методик и установок для анализа содержания йода в углеводе, основанных на рентгенорадиометрическом (РРА), рентгеноспектральном с ионным возбуждением (ХРИ), рентгенофлуоресцентном (РФА) анализах.

ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

В исследованиях использовались установки и макет установки, разработанные в ННЦ ХФТИ. При использовании метода РРА применялся разработанный макет установки (рис. 1), при этом возбуждение х.р.и. осуществлялось одним или тремя радиоактивными источниками ^{241}Am «ИГИА-1м-5» с активностью $3,9 \cdot 10^9$ Бк.

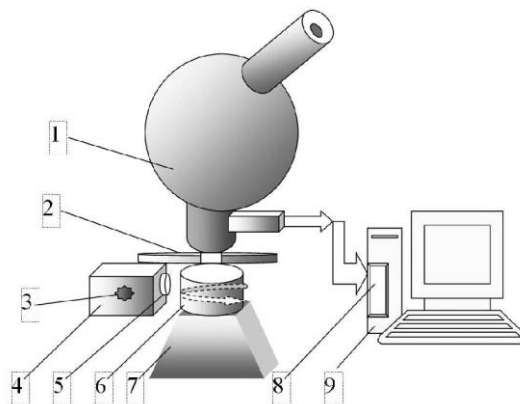


Рис. 1. Схема макета установки для РРА: 1 – блок детектирования; 2 – коллиматор с поглощающим фильтром детектора; 3 – радиоактивный источник; 4 – контейнер; 5 – коллиматор с поглощающим фильтром источника; 6 – исследуемый образец; 7 – устройство вращения и (опционально) смены образца; 8 – спектрометрический тракт; 9 – персональный компьютер

При использовании метода РФА применялись разработанные в ННЦ ХФТИ установки элементного анализа «УРС-2.0» и «ЭЛЕАН» [14] (рис. 2). Исследования с использованием метода ХРИ проводились на аналитическом ядерно-физическом комплексе «Сокол» ННЦ ХФТИ [15]. Для возбуждения х.р.и. в объекте использовался пучок ускоренных протонов.



Рис. 2. Общий вид установки РФА «ЭЛЕАН»

При этом задействовался или канал №1–45° с вакуумной измерительной камерой (рис. 3), или канал №2–26° с выводом протонного пучка в атмосферу (рис. 4).

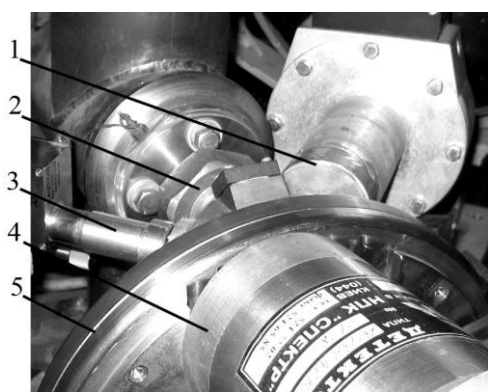


Рис. 3. Общий вид канала с вакуумной измерительной камерой:

- 1 – детектор с кристаллом Ge(HP);
- 2 – ионопровод с диафрагмами;
- 3 – детектор с кристаллом Si(PIN);
- 4 – детектор с кристаллом Ge(Li);
- 5 – измерительная камера

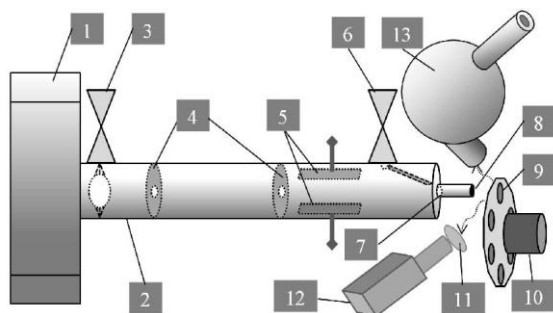


Рис. 4. Схема канала аналитического комплекса «Сокол» с выводом пучка протонов в атмосферу:

- 1 – распределительный магнит; 2 – ионопровод;
- 3 – вакуумный клапан; 4 – танталовые диафрагмы;
- 5 – пластины системы электростатического отклонения пучка; 6 – быстродействующий вакуумный клапан; 7 – медный коллиматор;
- 8 – алюминиевая фольга окна вывода пучка в атмосферу; 9 – облучаемая мишень;
- 10 – устройство передвижения мишеней;
- 11 – коллиматор с фильтром;
- 12 – Si(PIN)- или Si(Li)-детектор;
- 13 – Ge(HP)- или Ge(Li)-детектор

Для регистрации х.р.и. (а также гамма-излучения от ядерных реакций при возбуждении пучком протонов) применялись блоки детектирования (БД) с полупроводниковыми кристаллами Si(PIN), Si(Li), Ge(HP), CdTe, CdZnTe, Ge(Li). В качестве спектрометрических усилителей и многоканальных амплитудных анализаторов использовались блоки PX5 и 2PX2CR производства «АМРТЕК», БУИ-3К, процессор импульсных сигналов SBS-75 производства «ГРИН СТАР ИНСТРУМЕНТС», АИ-1024-95. Обработка спектрометрической информации проводилась на персональном компьютере с использованием программных обеспечений, разработанного производителями блоков PX5, SBS-75 и в ННЦ ХФТИ.

Для определения аналитических характеристик методик использовались изготовленные калибровочные образцы с концентрациями йода в особо чистом углероде: 0,5; 0,1; 0,05; 0,01; 0,005 и 0,001 мас. %.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

РЕНТГЕНОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Как показано в [16, 17], при размещении радиоактивного источника и детектора по одну сторону от исследуемой пробы интенсивность аналитической линии I_2 х.р.и. определяется следующим выражением:

$$I_2 = \frac{I_1}{4\pi R^2} s W_q \frac{S_q - 1}{S_q} p_2 \frac{E_2}{E_1} \tau \frac{C}{\frac{\mu^1}{\sin \varphi} + \frac{\mu^{11}}{\sin \psi}} \times$$

$$\times \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\mu^1}{\sin \varphi} + \frac{\mu^{11}}{\sin \psi} \right) m \right] \right\},$$

где R – расстояние от детектора до пробы; I_1 – интенсивность облучающего образец излучения; s – площадь плоскопараллельного слоя исследуемой пробы; W_q – коэффициент выхода флуоресценции при возбуждении атома определяемого элемента на q -уровень; S_q – величина скачка поглощения для q -уровня; p_2 – вероятность перехода атома, возбужденного на q -уровень с излучением аналитической линии; E_1 – энергия облучающих образец фотонов; E_2 – энергия фотонов флуоресценции; τ – массовый коэффициент фотоэлектрического поглощения первичного излучения в определяемом элементе; C – концентрация определяемого элемента в исследуемой пробе; μ^1 и μ^{11} – массовые коэффициенты поглощения первичного и вторичного излучений в исследуемой пробе; φ и ψ – углы скольжения к плоскости пробы соответственно первичного и вторичного излучений; m – поверхностная плотность пробы. Так как при прохождении возбуждающего излучения через вещество происходит неупругое (комptonовское) рассеяние фотонов, имеющее угловую зависимость, то правая часть приведенного выражения превращается в интеграл по энергии. При этом зависимость дифференциального сечения рассеяния от угла, численно равная вероятности образования

рассеянного фотона $d\sigma_{K-H}$ и попадания его в телесный угол $d\Omega$, определяется выражением:

$$\left(\frac{d\sigma_{K-H}}{d\Omega} \right)_e = \frac{r_0^2}{2} \left\{ \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]^2} \times \left[1 + \cos^2 \theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right] \right\}, \quad (2)$$

где r_0 – классический радиус электрона, равный $2,8 \cdot 10^{-13}$ см; θ – угол между направлениями распространения падающих и рассеянных фотонов; $\alpha = E_0/(m_e c^2)$, E_0 – энергия падающего фотона, m_e – масса электрона, c – скорость света в вакууме. На рис. 5 приведена зависимость дифференциального сечения от угла рассеяния для некоторых энергий фотонов [11].

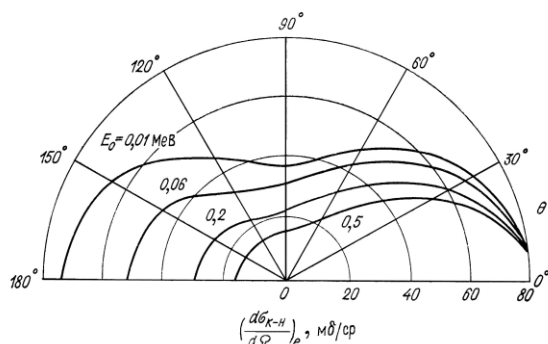


Рис. 5. Зависимость дифференциального сечения от угла рассеяния и энергии фотонов

Условия измерений при проведении РРА должны в первую очередь обеспечивать максимальную чувствительность измерений, при этом требуется достичь наилучшего соотношения между интенсивностью аналитической линии и мешающим излучением (соотношение сигнал/фон). Как видно из выражения (1), увеличение интенсивности I_2 может достигаться выбором входящих в это выражение величин. Однако эти величины обычно ограничены свойствами и характеристиками (в том числе и конструктивными) применяемых в измерениях узлов: источника радиоактивного излучения, детектирующей системы, измеряемого объекта. Выбор величин параметров измерений представляет во многих случаях трудоёмкую задачу.

В первую очередь важно выбрать значение E_2 аналитической линии. Для определения йода в углероде нецелесообразно использовать линии L-серии, так как из-за высокой степени самопоглощения в материале образца невозможно увеличивать поверхностную плотность m путём увеличения толщины анализируемой пробы. Кроме того, в энергетическом диапазоне L-серии может присутствовать излучение K-серии легких элементов, входящих в конструкцию узлов измерительного устройства, что приведёт к их наложению в измеряемых спектрах. Поэтому в данном случае целесообразно использование для аналитических целей K-серии. Была выбрана, как наиболее интенсивная, K_{α} -серия, которая состоит из близкорасположенных линий с энергиями 28,607 и 28,312 кэВ и во многих существующих в настоящее

время полупроводниковых блоках детектирования в связи с недостаточной величиной энергетического разрешения регистрируется как одна уширенная линия.

Выбор значения E_1 возбуждающего излучения обусловлен следующими факторами: энергия E_1 должна быть обязательно выше энергии K-края поглощения йода (т. е. величины 33,169 кэВ) и достаточно близкой к ней. Однако при этом следует учитывать, что при достаточно близком расположении этих энергий неупругорассеянное излучение в анализируемом объекте может наложиться на аналитическую линию. Для начальной энергии фотона 59,535 кэВ при однократном рассеянии комптоновское смещение простирается до энергии 48,3 кэВ. Аналогичный расчёт для повторно рассеянного фотона с максимальным смещением 48,3 кэВ показывает, что тогда смещение простирается до 40,6 кэВ, а для трёхкратного рассеяния получаем величину 35,0 кэВ. Таким образом, видим, что даже трёхкратное неупругое рассеяние не накладывается на аналитическую K_{α} -серия йода. Следует отметить, что неупругорассеянное излучение более эффективно возбуждает K-серия йода (W_q в выражении (1)), чем исходное нерассеянное.

Выбор геометрических параметров системы источник–образец–детектор в значительной степени зависит от характеристик (в том числе и конструктивных) источника излучения и детектора, а также от свойств материала образца. Так, согласно выражению (1), увеличение величины I_2 возможно за счёт увеличения площади образца s . Но такое увеличение ограничивается величиной апертурного угла детектора с коллиматором и апертурным углом источника возбуждающего излучения. Удаление образца от детектора (с целью не выйти за пределы апертурного угла) приводит к увеличению расстояния R . Так как этот параметр входит в знаменатель выражения (1) в квадратной степени, то он является во многом определяющим. Увеличение поверхностной плотности m (путём увеличения толщины образца) ограничено значениями массовых коэффициентов поглощения первичного и вторичного излучений в исследуемой пробе – μ^1 и μ^{11} . Для оценки возможной анализируемой толщины образца с помощью компьютерной программы «GUCSA» [18] посчитаны массовые коэффициенты поглощения для энергий K_{α} - и K_{β} -серий йода и энергии излучения 59,535 кэВ из ^{241}Am в углероде. Используя эти величины, получены значения кратности ослабления в порошке углерода различной толщины с насыпной плотностью 0,5 г/см³ для соответствующих энергий излучения: так, например, при толщине слоя 3 см кратность ослабления излучения с энергией 28,612 кэВ ($K_{\alpha 1}$ -йода) равна 0,34, а для энергии 59,535 кэВ (от источника ^{241}Am) равна 0,25.

Из рис. 5 видно, что дифференциальное сечение однократного комптоновского рассеяния для фотонов с энергией 60 кэВ имеет минимум в диапазоне углов рассеяния 80...100°. Исходя из этого, для уменьшения загрузки спектрометри-

ческого тракта неупругорассеянным излучением направление оси кристалла детектора предпочтительно выбрать равным 90° к направлению первичного возбуждающего излучения.

При выборе аппаратуры для регистрации х.р.и. основными критериями были следующие характеристики: энергетическое разрешение в области аналитической линии с энергией E_2 , эффективность регистрации для этой энергии, максимальная входная нагрузка (быстродействие). Исследование функций отклика БД с различными полупроводниковыми кристаллами показало, что при РРА предпочтительным является использование блоков с кристаллами из высококачистого германия (например БДЭР-2-25) или с кристаллами из теллурида кадмия (например XR-100T «АМРТЕК»). На рис. 6 показаны измеренные с помощью БДЭР-2-25 спектры х.р.и. от калибровочных образцов, облучаемых одним источником «ИГИА-1м-5». В представленных спектрах отсутствуют какие-либо линии, интерферирующие с аналитической линией йода; наблюдается высокое соотношение сигнал/фон для аналитического пика.

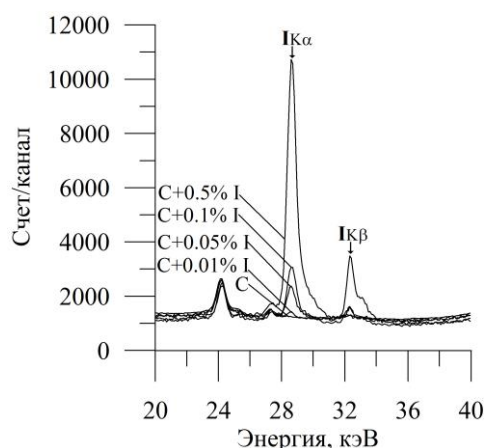


Рис. 6. Спектры х.р.и., измеренные с помощью БД с кристаллом Ge(HP), от калибровочных образцов, которые облучены одним источником «ИГИА-1м-5»

Следует отметить, что для эксплуатации такого БД требуется наличие жидкого азота, что в некоторых случаях является сдерживающим фактором его применения.

Для построения градуировочного графика использовались изготовленные калибровочные образцы с концентрациями йода в углеводе: 0,5; 0,1; 0,05; 0,01; 0,005 и 0,001 мас.%, а его построение проводилось по результатам не менее трёх определений для каждой концентрации. В качестве подгоночной функции была выбрана линейная зависимость, параметры которой определялись по методу наименьших квадратов. Используя полученное уравнение прямой, посчитан коэффициент корреляции r_{XY} . Полученное значение ($r_{XY} = 0,99863$) свидетельствует об очень высокой корреляционной зависимости между площадью аналитического пика (площадью $K\alpha$ -мультиплета йода) и концентрацией. Для калибровочного

образца с концентрацией йода 0,1 мас.% было проведено 20 измерений с поворотом образца после каждого измерения (время измерения составляло 5 мин). По результатам измерений посчитано относительное среднеквадратичное отклонение (коэффициент вариации): $S_r = 0,037$. По результатам измерения калибровочных образцов с 0,001; 0,005 и 0,01 мас.% в течение 3 ч вычислен предел обнаружения: $3 \cdot 10^{-4} \dots 7 \cdot 10^{-4}$ мас.%.

При использовании детекторов из CdTe мешающим фактором является интерференция аналитической $K\alpha$ -линии йода с пиком вылета из Te от упругорассеянного излучения 59,535 кэВ из ^{241}Am . Для устранения этой интерференции была исследована возможность применения вторичных излучателей (ВИ). В качестве материала для ВИ использовались окислы редкоземельных элементов. Как видно из измеренных спектров калибровочных образцов (рис. 7) с ВИ из окиси самария, интерференция аналитической линии йода с пиком вылета отсутствует, а соотношение сигнал/фон имеет высокое значение.

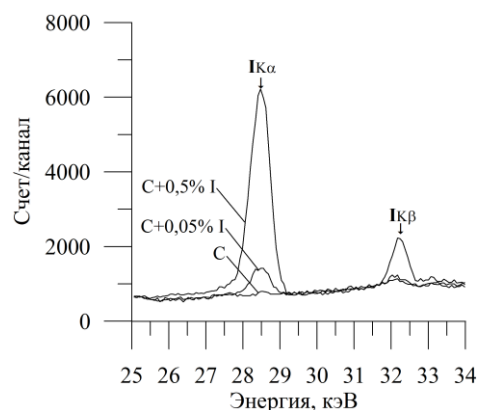


Рис. 7. Спектры х.р.и. от калибровочных образцов, измеренные БД XR-100T «АМРТЕК» с кристаллом CdTe при возбуждении источником «ИГИА-1м-5» с ВИ из окиси самария

Таким образом, при определении содержания йода в углеводе методом РРА с использованием БД с кристаллом Ge(HP) при проведении измерений в стационарных условиях могут быть достигнуты высокие аналитические характеристики (величины предела обнаружения, погрешности измерений). При использовании БД с кристаллом CdTe, термоэлектрическим охлаждением и с применением ВИ могут быть реализованы малые габариты и мобильность измерительной установки.

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД

При проведении РФА в большинстве случаев источником возбуждения х.р.и. в объекте является рентгеновская трубка [19]. Спектр рентгеновской трубки представляет собой тормозной спектр излучения электронов в материале анода совместно с х.р.и. материала анода. Вследствие этого, при оценке параметров установки анализа элементного содержания, как и в случае РРА, возможно использование выражения (1), но при этом правую часть следует представить как сумму достаточно

малых отрезков энергетического диапазона. Упруго- и неупругорассеянные в измеряемом объекте тормозные излучения в области аналитической линии (28,6 кэВ – для $K\alpha$ -линии йода) существенно ухудшают соотношение сигнал/фон, не давая достичь высоких показателей предела обнаружения и погрешности измерения. Это видно из рис. 8, где представлен спектр калибровочного образца с 0,05 мас.% йода, измеренный на установке «УРС-2.0» при напряжении на рентгеновской трубке 50 кВ с использованием БД с кристаллом Ge(HP).

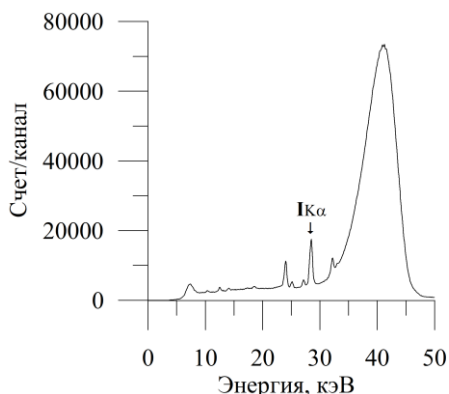


Рис. 8. Спектр х.р.и. от калибровочного образца с 0,05 мас.% йода при возбуждении излучением от рентгеновской трубки

Повышение аналитических характеристик РФА может быть достигнуто применением ВИ. При выборе материала для ВИ следует учитывать наличие пика вылета из материала БД. Так, например, использование Sm с БД с кристаллом из Ge(HP) (как это было реализовано для БД с кристаллом CdTe) неприемлемо. Это вызвано наложением пика вылета $K\beta$ -серии Ge от упругорассеянной $K\alpha$ -серии Sm. Были исследованы характеристики РФА при использовании ВИ, содержащих редкоземельные элементы Ce, Pr и Nd. На рис. 9 представлен участок спектра х.р.и. калибровочного образца с 0,05 мас.% йода с применением ВИ из Nd; БД – с кристаллом Ge(HP); напряжение на рентгеновской трубке – 50 кВ, ток – 10 мА; время набора спектра – 10 мин.

При измерении в течение 30 мин на 1 спектр ряда калибровочных образцов с ВИ, содержащими Ce, Pr или Nd, были получены пределы обнаружения йода в углероде на уровне $(4...6) \cdot 10^{-4}$ мас.%. Расчёты показывают, что возможно достижение предела обнаружения ниже 1 ppm при времени измерения десятки минут. Это может быть достигнуто повышением анодного напряжения (при соответствующем выборе типа рентгеновской трубки и источника питания). При этом увеличивается доля тормозного спектра с энергией выше K -края поглощения элемента ВИ и, таким образом, увеличивается интенсивность излучения из ВИ. Менее эффективным является вариант повышения тока рентгеновской трубки (совместно с применением быстродействующего спектрометрического тракта), так как при этом повышаются интенсивности как х.р.и. от ВИ, так и повышающее фон в области аналитического пика

рассеянное тормозное излучение от рентгеновской трубки.

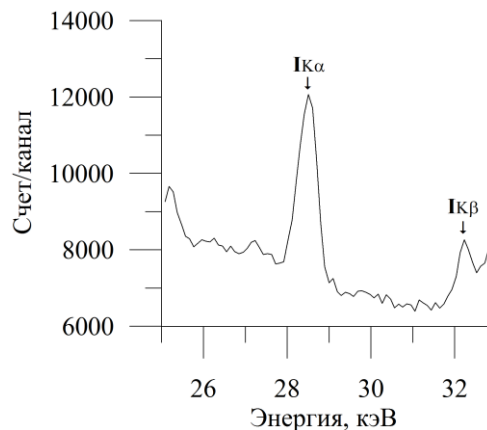


Рис. 9. Участок спектра х.р.и. калибровочного образца с 0,05 мас.% йода с применением ВИ из Nd

Важным достоинством метода РФА с возбуждением излучения от рентгеновской трубки, по сравнению с методом РРА, является меньшая степень радиационной опасности, так как ионизирующее излучение присутствует только в процессе измерения и отсутствует в выключенной установке.

РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ С ИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Использование пучка ускоренных ионов для возбуждения х.р.и. (метода ХРИ) предоставляет дополнительную возможность (при одновременном применении соответствующей дополнительной детектирующей аппаратуры) проводить элементный анализ по мгновенному излучению от ядерных реакций. Такое сочетание позволяет выполнять многоэлементный анализ объектов в диапазоне элементов от углерода до урана. Для определения йода совместно с другими элементами в углероде использовался пучок ускоренных протонов на аналитическом ядерно-физическом комплексе «Сокол» ННЦ ХФТИ.

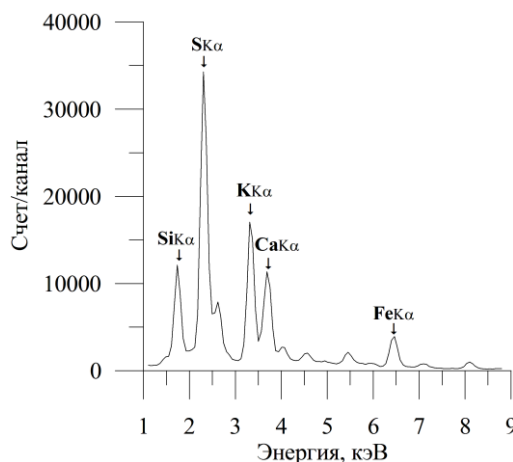


Рис. 10. Участок спектра х.р.и. от образца углерода марки SCT-3, измеренный БД с кристаллом Si(PIN), при возбуждении пучком протонов с энергией 1745 кэВ

Для регистрации х.р.и. йода и других элементов середины периодической таблицы по К-серии применялся БД с кристаллом из Ge(HP). Для регистрации х.р.и. К-серии от элементов начала периодической таблицы, а также L- и M-серий элементов середины и конца периодической таблицы применялся БД с кристаллом из Si(PIN). Для регистрации мгновенного излучения от ядерных реакций применялся БД с кристаллом из Ge(Li) (см. рис. 3). После проведения методических исследований с калибровочными образцами был определен элементный состав применяемых углеродных фильтров углеродных наполнителей марок СКТ-3, Электрод-Д, Extra (С40/4). На рис. 10 приведен спектр х.р.и. от образца углерода марки СКТ-3, измеренный БД с кристаллом Si(PIN).

Измерение проводилось при энергии протонов 1745 кэВ и токе пучка протонов 50 нА.

Использование трёх БД позволило одновременно определить в углеродных образцах содержание (кроме йода) Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn.

Дополнительные возможности метода ХРИ при исследованиях позволяют использовать канал вывода пучка протонов в атмосферу (канал №2–26°) (см. рис. 4). Это является возможностью проводить анализ крупногабаритных объектов сложной формы.

Сравнение основных характеристик рассмотренных методов определения содержания йода в углеводе представлено в таблице.

Таблица

Сравнение основных характеристик методов определения содержания йода в углеводе

Характеристика	Метод			
	РРА	ХРИ		РФА
		в вакууме	в атмосфере	
Проведение многоэлементного анализа	возможно	возможно	возможно	возможно, но есть ограничения
Подготовка проб	не требуется	требуется	не требуется	не требуется
Предел обнаружения	$3 \cdot 10^{-4}$ мас.%	$1 \cdot 10^{-2}$ мас.%	$1 \cdot 10^{-2}$ мас.%	$4 \cdot 10^{-4}$ мас.%
Энергозатраты	невысокие	высокие	высокие	высокие
Экспрессность	высокая	невысокая	высокая	высокая
Автоматизация измерений	возможна	затруднена	возможна	возможна
Измерение распределения йода в крупногабаритных объектах	возможно	невозможно	возможно	возможно

ВЫВОДЫ

Исследования характеристик методов определения элементного содержания йода в углеводе, основанных на регистрации х.р.и., показывают, что при решении задачи разработки методики определения адсорбирующих свойств (по отношению к йодосодержащим соединениям) углеродных материалов фильтров систем вентиляции АЭС наиболее предпочтительным является использование метода РРА. Методика и установка для определения содержания по РРА имеют высокие аналитические показатели (предел обнаружения и погрешность определения) при невысокой стоимости и малых габаритах, с возможной мобильностью установки (при применении БД с термоохлаждаемым кристаллом CdTe).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. С.А. Хотимченко. Методы количественного определения йода в пищевых продуктах и продовольственном сырье // *Вопросы питания*. 2004, №5, с. 42-48.
2. С.А. Хотимченко, Г.Ф. Жукова, Ю.П. Алешко-Ожевский и др. Результаты межлабораторных исследований по определению содержания йода в йодированном молочном белке различными

методами // *Микроэлементы в медицине*. 2006, №3, с. 43-48.

3. Е.М. Королева. Фотометрическое определение содержания йода в биологических образцах сложного состава // *Химико-фармацевтический журнал*. 2000, №8, с. 50-52.

4. Н.К. Колотилина, А.М. Долгоносков. Определение йодид-иона в минерализованной природной воде методом изокритической ионной хроматографии с кондуктометрическим детектированием // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2009, т. 9, в. 5, с. 610-615.

5. И.О. Томашевский, Л.Д. Сошин, А.И. Лучшев и др. Неинвазивный рентгенофлуоресцентный анализ для контроля степени насыщения йодом щитовидной железы // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2003, №3, с. 56-59.

6. J.H. Chao. Determination of ^{129}I in ^{131}I -pharmaceuticals Produced in THOR // *Applied Radiation and Isotopes*. 1998, v. 49, N 12, p. 1587-1590.

7. C. Ingelbrecht, J. Lupo, K. Raptis, et al. ^{129}I targets for studies of nuclear waste transmutation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2002, v. 480, p. 204-208.

8. J.H. Chao, C.L. Tseng, C.J. Lee, et al. Analysis of I-129 in radwastes by neutron activation // *Applied Radiation and Isotopes*. 1999, v. 51, p. 137-143.

9. Chaohui Hen, Xiaolin Hou, Yaolin Zhao, et al. ^{129}I level in seawater near a nuclear power plant determined

by accelerator mass spectrometer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2011, v. 632, p. 152-156.

10. I.M. Neklyudov, A.N. Dovbnya, N.P. Dikiy, et al. Features of adsorbed chemical elements and their isotopes distribution in iodine air filters au-1500 of nuclear power plant // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2013, N 3(85), p. 192-200.

11. С.В. Мамиконян. *Аппаратура и методы флуоресцентного рентгенорадиометрического анализа*. М.: «Атомиздат», 1976, с. 280.

12. В.П. Афонин, Н.И. Комяк, В.П. Николаев и др. *Рентгенофлуоресцентный анализ*. Новосибирск: «Наука», 1991, с. 173.

13. В.М. Коляда, А.К. Зайченко, Р.В. Дмитренко. *Рентгеноспектральный анализ с ионным возбуждением*. М.: «Атомиздат», 1978, с. 247.

14. В.В. Левенец, А.А. Щур, А.П. Омельник и др. Анализ элементного состава платинородиевых

сплавов методом РФА // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2003, т. 69, №5, с. 7-20.

15. В.Н. Бондаренко, Л.С. Глазунов, А.В. Гончаров и др. Аналитический ядерно-физический комплекс НИЦ ХФТИ «Сокол» // *Book of Abstracts «International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy»*. Kyiv, Ukraine, May 29–June 03, 2006, p. 852-857.

16. М.А. Блохин. *Физика рентгеновских лучей*. М.: «Гостехтеориздат», 1957, с. 518.

17. А.Л. Якубович, Е.И. Зайцев, С.М. Пржигаловский. *Ядерно-физические методы анализа минерального сырья*. М.: «Атомиздат», 1982, с. 393.

18. J.A. Maxwell, J.L. Campbell, W.J. Teesdale. The Guelph PIXE software package // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1989, v. 43, Issue 2, p. 218-230.

19. А.Г. Ревенко. *Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов*. Новосибирск: «Наука», 1994, с. 264.

Статья поступила в редакцию 26.01.2015 г.

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЙОДУ У ВУГЛЕЦІ, НА ПІДСТАВІ РЕЄСТРАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИЧНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

О.П. Омельник, В.В. Левенець, О.Ю. Лонін, А.О. Щур

Проведено дослідження можливостей рентгенорадіометричного, рентгенофлуоресцентного та рентгеноспектрального з іонним збудженням методів визначення вмісту йоду у вуглеці. Наведено аналітичні та технічні характеристики експериментальних установок елементного аналізу, що використовують ці методи. Запропоновано способи поліпшення розглянутих характеристик

COMPARISON OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF IODINE IN CARBON, BASED ON THE DETECTION OF THE CHARACTERISTIC X-RAY RADIATION

O.P. Omelnyk, V.V. Levenets, A.Yu. Lonin, A.O. Shchur

The investigation features of methods of X-ray radiometric, X-ray fluorescence and X-ray with an ions excitation for determination of iodine in carbon has been made. The analytical and technical characteristics of experimental setups for elemental analysis using these methods presents. Ways of improving the characteristics considered.