

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН»
Филиал «Институт атомной энергии»
(Филиал «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»)

УДК 621.039.55

Медетбеков Берик Сакенович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИНАА НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М.**

**Работа, представленная на XVIII конференцию-конкурс НИОКР
молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
(прикладные исследования)**

Руководитель: Попов Ю.А. заместитель начальника
лаборатории нейтронной физики (241)

г. Курчатов, 2020 г.

АВТОР

Медетбеков Берик Сакенович

младший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики, Филиала «Институт атомной энергии» РГП «НЯЦ РК»,

Год рождения –1986

образование высшее (окончил СГУ имени Шакарима в 2008 году),
специальность – «Ядерные реакторы и энергетические установки»,
квалификация по диплому – инженер.

Магистратура, окончил КазНУ им. аль-Фараби в 2019 году,
специальность – «Теплоэнергетика»

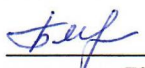
работает с 2010 года в лаборатории нейтронной физики (241),
общий стаж работы – 10 лет

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Заместитель начальника
лаборатории 241

 8.04.2020 Попов Ю.А.
подпись, дата

Младший научный сотрудник
лаборатории 241

 8.04.2020 Медетбеков Б.С.
подпись, дата

Начальник лаборатории 241

 8.04.2020 Прозорова И.В.
подпись, дата

МЕДЕТБЕКОВ Б.С.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В ОБРАЗЦАХ БЕТОНА ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНАА НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М.

Работа, представляемая на конференцию-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов
Национального ядерного центра Республики Казахстан
от филиала «ИАЭ» РГП «НЯЦ РК»

071100, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 10,
тел. (7-322-51) 2-31-25, 2-51 (вн.)
факс (7-322-51) 2-31-25
e-mail: medetbekov@nnc.kz

РЕФЕРАТ

Конкурсная работа содержит 17 страниц, 12 рисунков, 18 источников.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ (ИНАА),
БЕТОН ИТЭР, ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЯ

Актуальность: Исследовательская работа заключалась в изучении активационных характеристик бетона, который будет использован при эксплуатации и декомиссии ИТЭР. В бетоне марки - М8В стояло задача определения содержания элементов, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку при эксплуатации и декомиссии ИТЭР. Работа была проведена в 2019 году в рамках международного договора между Республикой Казахстан и организации ИТЭР.

Объект исследования: образец бетона марки М8В - конструкционного материала реактора ИТЭР.

Цель работы: является определение содержания примесей в образце бетона марки М8В конструкционного материала реактора ИТЭР которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку при эксплуатации и декомиссии ИТЭР.

Задачи исследований:

- получение образца бетона (керна) из Франции (г. Кадараш);
- подготовка проб для облучения (гомогенизация);
- разработка ампульного устройства для облучения;
- проведение необходимых нейтронно-физических и теплофизических расчетов;
- облучение отобранных, взвешенных и маркированных образцов в потоке тепловых нейтронов в реакторе ИВГ.1М;
- проведение гамма спектрометрических измерений образцов бетона и стандартных образцов;
- расчет концентрации элементов на наличие интересующих примесей;
- проведение сравнительного анализа полученных данных.

Методика исследований: Инструментальный нейтронно-активационный анализ, относительный метод (метод стандартов) определения количественных результатов.

Результаты работ: Проведен инструментальный нейтронно-активационный анализ образцов, приготовленных из керна бетона М8В. Облучение образцов реализовано в ФКЭ исследовательского реактора ИВГ.1М при флюенсе тепловых нейтронов $5,3 \cdot 10^{16}$ н/см². Гамма-спектрометрические измерения проведены с различной выдержкой облученных образцов от суток до одного месяца. Осуществлена обработка результатов гамма-спектрометрических измерений. Рассчитаны концентрации основных и примесных элементов.

Сравнение данных инструментального нейтронно-активационного анализа с аттестованными содержаниями элементов в стандартных образцах показывает их совпадение в пределах стандартного отклонения практически для всех определяемых элементов. Это

подтверждает высокую точность полученных результатов к примесям образцов бетона и правильность применения методики ИНАА. Результаты определения элементного состава верхней и нижней частей блока М8В совпадают с точностью до погрешности определения.

В бетоне марки - М8В определено содержание элементов, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку в помещениях при эксплуатации и декомиссии ИТЭР. Содержание элементов в бетоне М8В и погрешности - Cs – 1,3 ($\pm 0,2$) мг/кг, Eu – 0,54 ($\pm 0,09$) мг/кг, Sm – 2,2 ($\pm 0,35$) мг/кг, Ta – 1,7 ($\pm 0,3$) мг/кг, Tb – 0,32 ($\pm 0,04$) мг/кг.

Практическая ценность: Инструментальный нейтронно-активационный анализ, адаптируемый в нашей лаборатории впервые был востребован и прошел апробацию на международном уровне благодаря сотрудничеству с организацией ITER.

Личный вклад автора: участие в физических исследованиях, подготовка проб, проведения гамма-спектрометрии образцов и определение содержания примесей в образцах бетона.

Степень завершенности работы: завершена

Уровень конкурентоспособности: данная прикладная работа с использованием ИНАА для определения концентрации примесей в материалах имеет высокий уровень конкурентоспособности по сравнению с другими методами как радиохимический нейтронно-активационный анализ (РНАА), ICP-MS которые усложняются тем что требуется радиохимическое разделение образцов после облучения в первом случае и трудоемкий процесс подготовки проб для анализа во втором.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	7
1 ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ РЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА	7
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	9
3 ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ	10
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	11
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	17

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для анализа различных материалов наряду с классическими методами аналитической химии используются такие ядерно-физические методы как атомно-абсорбционная спектрометрия, рентгено-флуоресцентный анализ, атомная эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, синхротронное излучение, нейтронно-активационный анализ и другие. По проведенному сравнительному анализу можно сказать, что наиболее чувствительными являются радиофизические методы [1,2].

Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) является одним из предпочтительных методов, так как он позволяет, во-первых, получать информацию по большому числу элементов [3] и, во-вторых, ИНАА позволяет получить качественный и количественный анализ на наличие тех и иных элементов, содержащихся в исследуемом образце с хорошей точностью. В наши дни ИНАА применяется в различных сферах народного хозяйства: в геологии, в медицине, в археологии, в криминалистике и в экологии как эффективный инструмент для определения элементного состава любого образца-вещества и в любом агрегатном состоянии [4-9].

В работе [10], посвященной наведенной активности и активационным характеристикам бетонов радиационной защиты показано что, эти свойства определяются содержанием химических элементов, концентрация которых в исходных компонентах бетонов может изменяться от тысячных долей до процентов по массе. Для снижения активности и объемов радиоактивных отходов выбор защитных бетонов ядерных установок должен происходить с учетом наполнения состава бетона активационно-опасными элементами. Поэтому авторы обосновали необходимость и возможность создания банка данных по активационным характеристикам конструкционных и защитных материалов для ядерных установок. В результате на основе данных расчетно-экспериментальных исследований выделены важнейшие химические элементы, определяющие долгоживущую наведенную активность защитных бетонов, разработаны структура, содержание и информационная составляющая банка данных по активационным характеристикам защитных бетонов ядерных установок.

Наша исследовательская работа заключалась в изучении активационных характеристик бетонов различных марок, которые будут использованы при эксплуатации и декомиссии ИТЭР. Работа была проведена в 2019 году в рамках международного договора между Республикой Казахстан и организации ИТЭР.

В ходе подготовки к ИНАА было выполнено ряд задач: полученные образцы бетонов из Франции (г. Кадараш) необходимо было подготовить специальным способом - измельчить до состояния порошка; разработать ампульное устройство для облучения; провести все необходимые нейтронно-физические и теплофизические расчеты.

Далее было проведено облучение отобранных, взвешенных и маркированных образцов в потоке тепловых нейтронов в реакторе ИВГ.1М., гамма спектрометрические измерения образцов и расчет концентрации элементов на наличие интересующих примесей.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

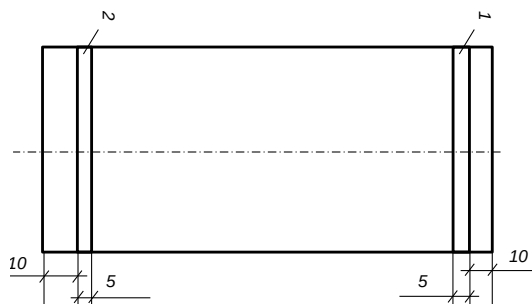
1 ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ДЛЯ РЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Керн бетона марки М8В (рисунок 1а), используемый в качестве конструкционного материала реактора ИТЭР, как уже указано выше, был получен из Франции с площадки строительства ИТЭР в г. Кадараше. Перед облучением на реакторе керн прошел специальную процедуру гомогенизации. Процедура включала в себя ряд этапов:

- вырезку дисковых заготовок толщиной 7-8 мм вблизи верхней и нижнего оснований керна (см. рисунок 1б и 1в);
- сушку заготовок в сушильном шкафу в течение 2 часов;
- полное дробление, измельчение материала вырезанных дисковых заготовок до получения порошка с размером частиц менее 400 мкм.
- гомогенизацию (перемешивание) полученного порошкообразного материала и отбор представительной пробы;
- полное дробление, измельчение представительной пробы до получения порошка с размером частиц менее 50 мкм.
- гомогенизацию (перемешивание) полученного порошкообразного материала, сушку в сушильном шкафу (муфельной печи) при температуре 110 °С в течение 2 часов.
- взвешивание полученного порошкообразного препарата, упаковку и маркировку.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Керн бетона марки М8В предназначенный для анализа (а), схема вырезки (б) и вырезка дисковой заготовки из керна бетона (в)

Иллюстрации процедур подготовки и внешнего вида материала приведены на рисунке 2.



а)



б)



в)

г)

Рисунок 2 – Процедуры подготовки проб бетона: а) – предварительное измельчение дисковых заготовок; б) – автоматизированное измельчение в вибрационной мельнице; в) – просеивание через сито с размером ячеек 400 мкм; г) – отбор представительной пробы

Также для экспериментов были подготовлены и расфасованы (рисунок 3) стандартные образцы:

1) стандартный образец СГД 2;

2) стандартный образец СГ-4.

СГД-2а - эссекситовое габбро, это крупнозернистая порода габбровой структуры, частично измененная вторичными процессами.

СГ-4 - субщелочной гранит принадлежит к гранитоидам, характеризуется высоко-калиевым и низко-кальциевым составом и соответствует разновидности переходной от субщелочной к щелочной.

Стандартные образцы которые были использованы для исследований, не требуют специальной подготовки. Подготовка образцов заключалась в расфасовке и взвешивании образцов в соответствии с методическими указаниями по подготовке проб минерального сырья для инструментального нейтронно-активационного анализа [11].



Рисунок 3 – Запаянные и маркированные пакеты с образцами для эксперимента.

Для эксперимента на реакторе был подготовлен и упакован в полиэтиленовые пакетики порошкообразный материал. Образцы C1B1..C1B3 подготовлены из нижней части бетонного керна М8-В. Образцы C1T1..C1T3 подготовлены из верхней части бетонного керна М8-В. Кроме образцов бетона подготовлены 2 стандартных образца типа СГД и СГ-4. На рисунке 3 представлены образцы бетона М8В и стандартные образцы, подготовленные для размещения в контейнере для реакторного эксперимента.

Далее все образцы были размещены внутри экспериментального устройства (ЭУ), которое представляло собой цилиндр из алюминиевого сплава (рисунок 4). ЭУ с образцами устанавливалось в экспериментальный канал реактора, при этом образцы во время облучения находились в месте, соответствующему максимальной плотности потока нейтронов. Дополнительно ЭУ было оснащено термопарой для теплометрирования крышки во время облучения.



Рисунок 4 – Облучательный контейнер и образцы до облучения

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Облучение ЭУ с образцами проведено при мощности реактора 300 кВт и длительностью 8000 сек (рисунок 5). После облучения, через сутки (24 часа), проведены первые гамма-спектрометрические измерения образцов (рисунок 6), с помощью двух полупроводниковых детекторов из особо чистого германия с разрешением по линии ^{60}Co 1332 кэВ менее 1,8 кэВ.



Рисунок 5 – Загрузка ЭУ с образцами в реактор для эксперимента



Рисунок 6 – Гамма-спектрометрические измерения образцов

На основе практического опыта по проведению инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) горных пород в лаборатории разработана методика для определения элементного состава минерального сырья [12]. Согласно методике, гамма-спектрометрические измерения каждого образца, включая стандартные образцы, проходили в три этапа:

1) Время выдержки образцов 1 суток. После реакторного облучения для определения содержания таких элементов, как (Ga), Mn, Na и K анализируемые образцы выдерживают в течение 1 суток.

2) Время выдержки образцов от 5 до 10 суток. После реакторного облучения для определения содержания таких элементов, как Ba, Ca, La, Lu, Na, Nd, Rb, Sm, U, W, Yb, образец рекомендуется выдерживать в течение периода времени от 5 до 10 сут. За это время на 2-3 порядка падает активность основного мешающего радионуклида ^{24}Na .

3) Время выдержки образцов от 25 до 30 суток. После реакторного облучения для определения таких элементов, как Eu, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Sc, Sr, Ta, Tb, Th, Zn, Zr образец рекомендуется выдерживать в течение периода времени от 25 суток. За это время на 2-3 порядка падает активность радионуклидов с периодом полураспада до 3 суток, в том числе ^{140}La , который вносит значительный вклад в радиационный фон от облученного образца.

Гамма-спектрометрические измерения стандартных и аналитических образцов проводились в одних и тех же условиях (стандартные и аналитические образцы устанавливаются на одинаковом расстоянии от детектора). Таким образом, идентичность условий соблюдается не только в отношении геометрии (формы и массы) образцов, условий размещения в экспериментальном канале реактора и соответственно условий облучения стандартных и аналитических образцов, но и в ходе гамма-спектрометрических измерений. Это являлось важным и неотъемлемым условием проведения ИНАА с использованием стандартных образцов.

3 ПОРЯДОК РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Концентрация элемента-аналита в анализируемом образце определялся в соответствии с основным уравнением (1) [13]:

$$C_a = C_{st} \left(\frac{N/t_c}{K_d K_c W} \right)_a / \left(\frac{N/t_c}{K_d K_c W} \right)_{st} \quad ((1))$$

где символы a и st относятся к элементу-аналиту в образце и в стандарте соответственно; C_a , C_{st} – концентрации элемента-аналита в образце и в стандарте соответственно, %;

N – площадь пика полного поглощения (ППП), имп.;
 t_c – время экспозиции («живое» время измерения), с;
 K_d – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время «охлаждения» t_d , отн. ед.;

K_c – поправка, учитывающая распад радиоактивного изотопа элемента-аналита за время измерения (счета) образца, отн. ед.;

W – масса образца (стандарта), г;

Следующим шагом исследования был анализ погрешностей определения концентрации аналита. Расчет относительной погрешности определения концентрации аналита в образце $\delta(C_a)$ проводится в соответствии с [13 - 18]. Основными принципами методики расчета погрешности являются:

- 1) полная погрешность результата измерений определяется как сумма случайной и систематической погрешностей, приведенных к одинаковой доверительной вероятности $p = 0.95$;
- 2) нормальный закон распределения составляющих случайной погрешности результата;
- 3) равномерный закон распределения составляющих систематической погрешности.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Особенности определения элементов Cs, Eu, Sm, Ta, Tb

Основной интерес при проведении ИНАА представляют элементы, продукты активации которых могут вносить значимый вклад в радиационную обстановку в помещениях при эксплуатации ИТЭР (в первую очередь, Cs, Eu, Sm, Ta, Tb). В этой связи ниже показаны некоторые детали определения концентрации этих элементов.

Для набора и анализа гамма спектров использовали программное обеспечение GENIE 2000.

Цезий. Для определения цезия использовалась линия гамма-излучения 795,8 кэВ радиоактивного изотопа цезия ^{134}Cs . Линия – синглет, помехи при анализе отсутствуют. Предел определения цезия для бетона М8В составил 0,07 мг/кг. На рисунке 7 показан пример определения параметров пика с энергией 796 кэВ в окне программы IPF.

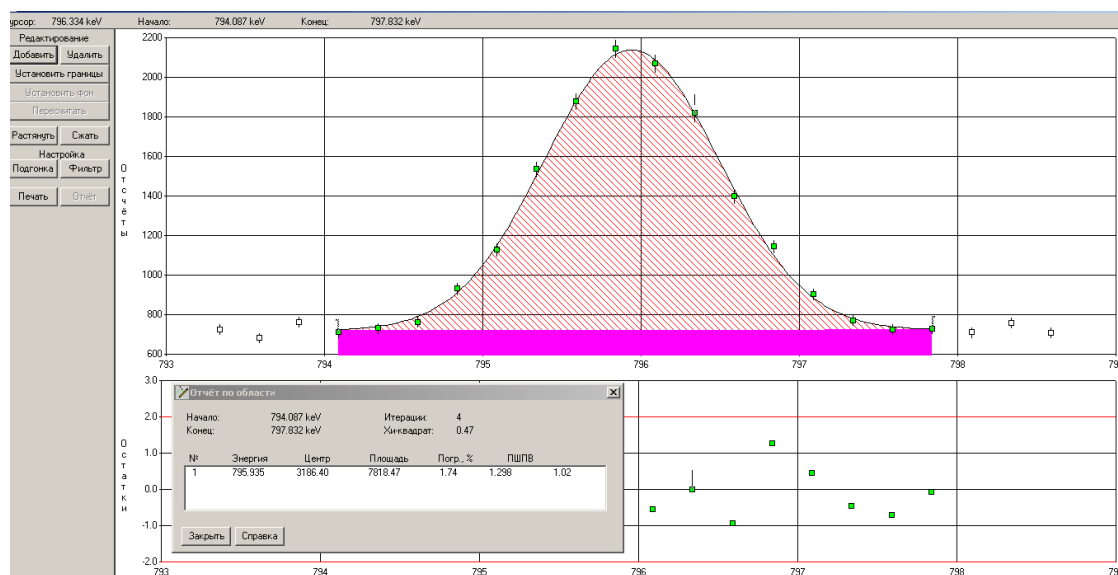
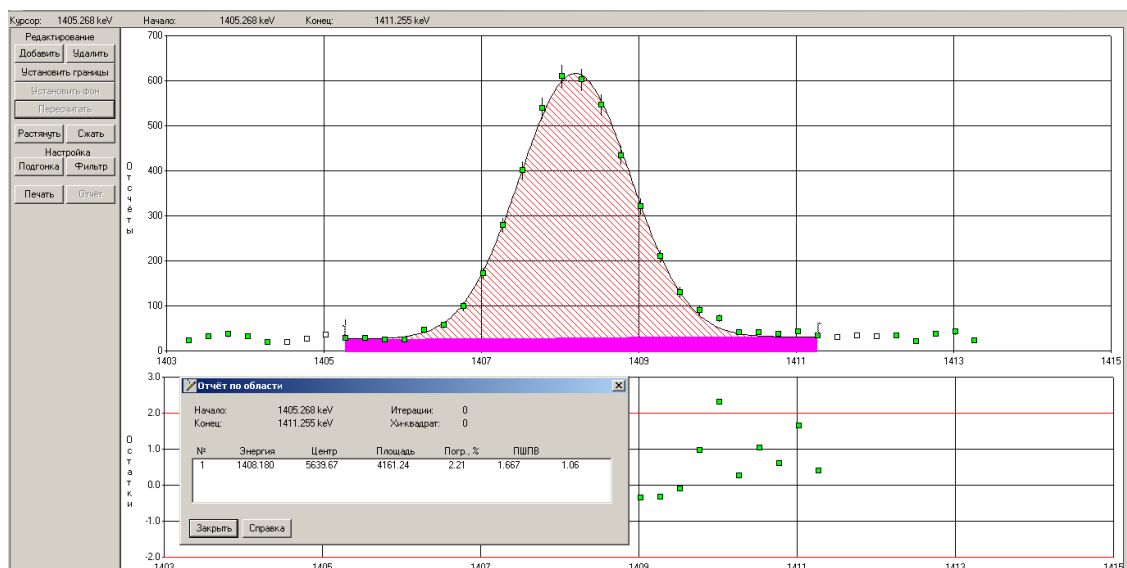
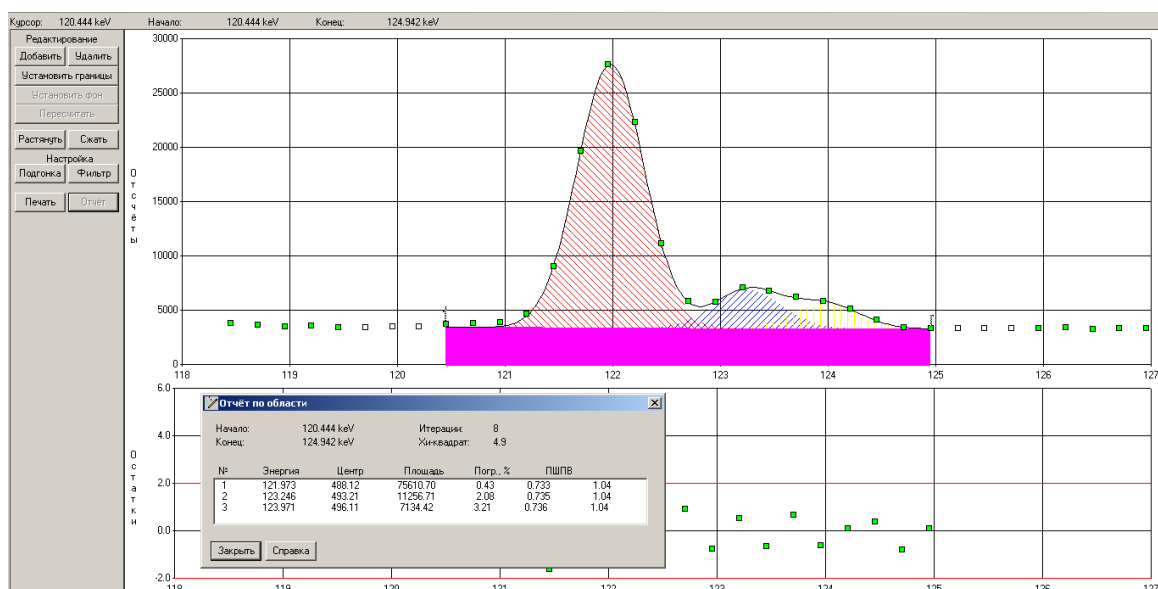


Рисунок 7 – Линия 796 кэВ (^{134}Cs) в окне IPF

Европий. Для определения европия использовались линии 121,8 и 1408 кэВ. Линия 1408 является синглетом (рисунок 8а). Линия 121,8 интерферирует с линией ^{154}Eu 123,1 кэВ и линией ^{131}Ba 123,8 кэВ (рисунок 8б). Предел определения европия составил 0,014 мг/кг для линии 1408 кэВ и 0,006 мг/кг для линии 122 кэВ.



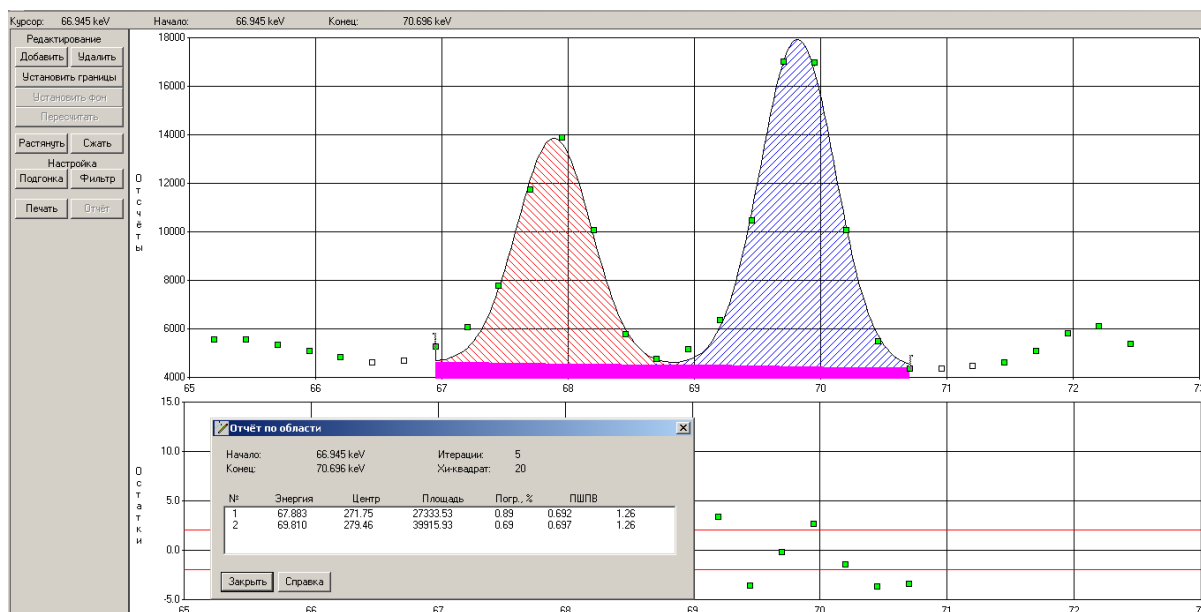
(а)



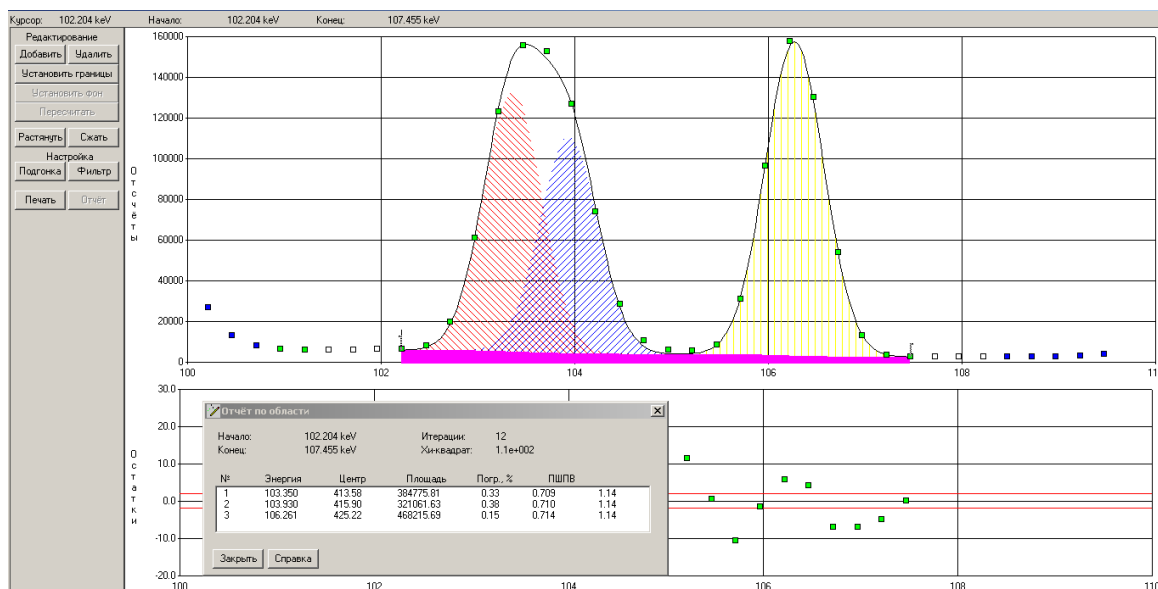
(б)

Рисунок 8 – Параметры ППП (^{152}Eu) с энергией 1408 кэВ (а) и 122 кэВ (б) в окне IPF

Самарий. Для определения самария ^{153}Sm использовалась линия с энергией 69,7 кэВ (рисунок 9а). Линию 103,2 кэВ ^{153}Sm (рисунок 9б) использовать затруднительно, поскольку наблюдается интерференция с линией 103,7 кэВ ^{239}Np . Возможная помеха – присутствие в пробе тяжелых делящихся ядер, в первую очередь ^{235}U . Предел определения для бетона М8В составил 0,04 мг/кг.



(а)



(б)

Рисунок 9 – Разделение линий в окне IPF: (а) – 67,7 кэВ (^{182}Ta) и 69,7 кэВ (^{153}Sm); (б) – 103,2 кэВ (^{153}Sm) (^{182}Ta) и 103,7 кэВ (^{239}Np)

Тантал. Для определения тантала использовалась линия 1221,4 кэВ радиоактивного изотопа тантала ^{182}Ta . На рисунке 10 показан пример определения параметров пика с энергией 1221 кэВ в окне программы IPF. Предел определения тантала для бетона М8В составил 0,04 мг/кг.

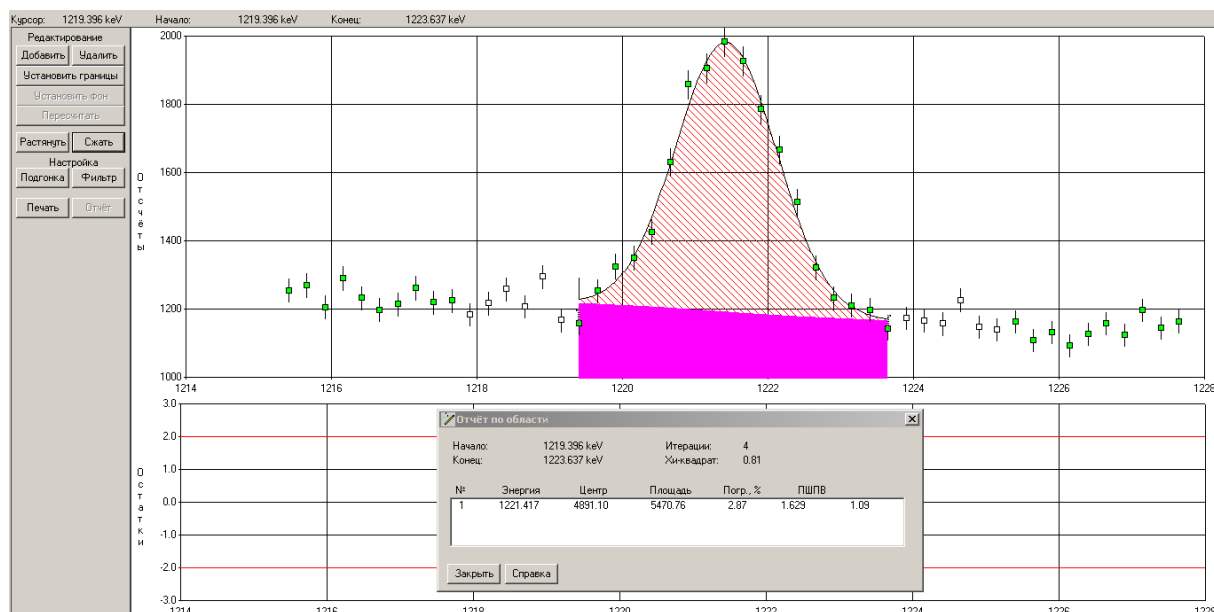


Рисунок 10 – Линия 1221 кэВ (^{182}Ta) в окне IPF

Тербий. Для определения тербия использовалась линия 298,6 кэВ радиоактивного изотопа тербия ^{160}Tb . На рисунке 11 показан пример разделения дуплета – двух интерферирующих линий 298,6 кэВ (^{160}Tb) и 300,1 кэВ (^{233}Pa) в окне программы IPF.

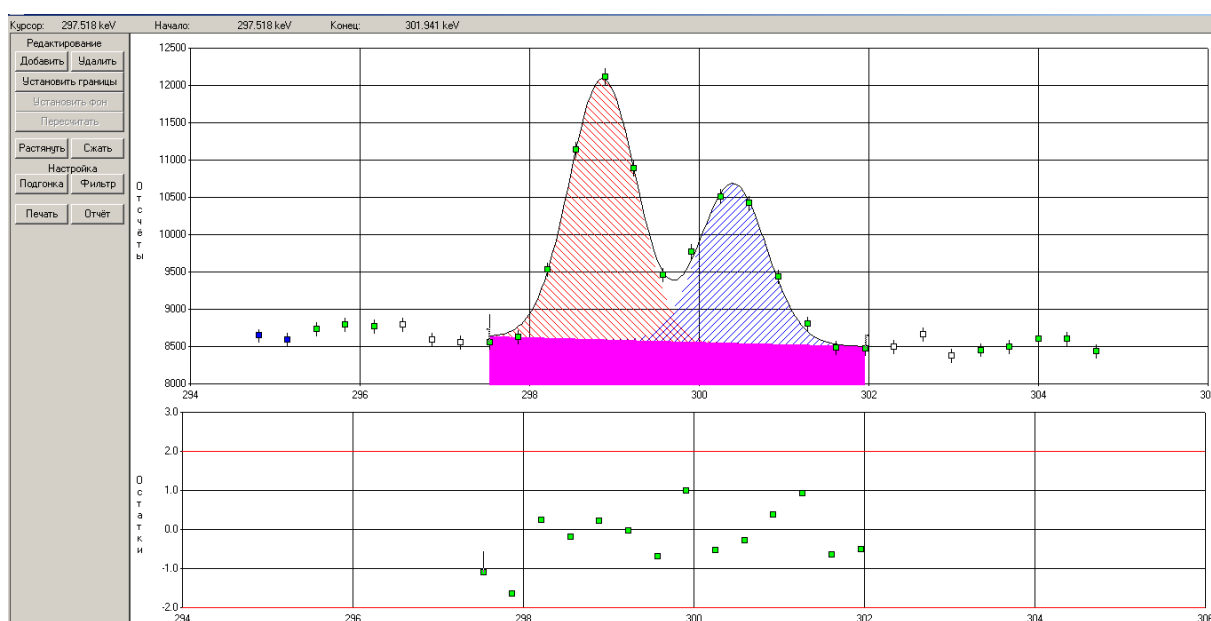


Рисунок 11 – Разделение линий 298,6 кэВ (^{160}Tb) и 300,1 кэВ (^{233}Pa)

Предел определения для бетона М8В составил 0,02 мг/кг.

Присутствие в образцах ^{235}U является возможной помехой при определении не только Sm, но и таких элементов, как Ce, Nd, Zr и в меньшей степени – La. Так при определении Zr, вклад осколочного (образующегося при делении) ^{95}Zr может составить до 90 % при содержании в образце урана 0,06 мг/кг, а циркония 0,003 мг/кг.

В рисунке 12 в виде диаграммы представлены результаты определения содержания элементов-аналитов для образцов из нижней и верхней части бетонного керна М8В.

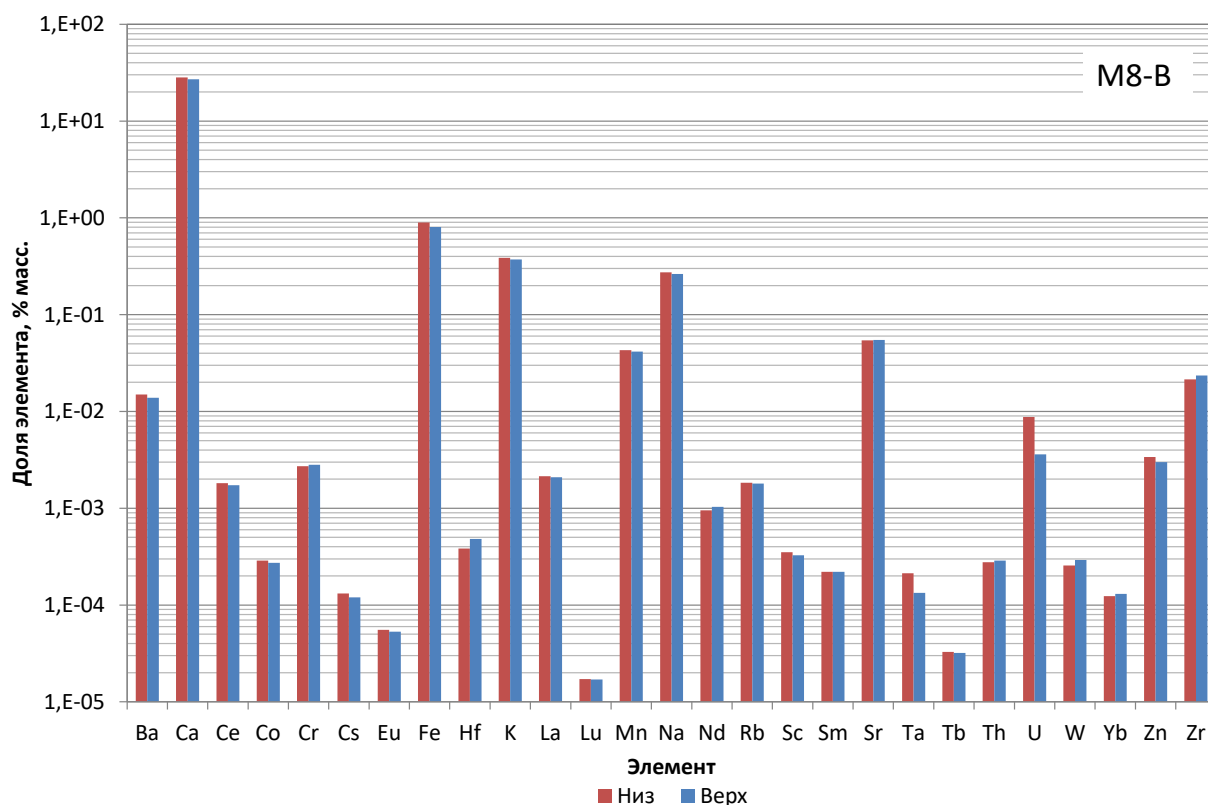


Рисунок 12 – Результаты определения содержания элементов-аналитов для образцов из нижней и верхней части бетонного керна М8В

В целях исключения возможных ошибок при измерениях гамма-спектров облученных образцов и оптимизации режимов измерения, измерения образцов проводились с помощью двух гамма-спектрометров. Это позволяет нивелировать инструментальную ошибку при однократных измерениях образцов. Измерения облученных образцов были проведены в трех сериях измерений. Для первой серии измерений выдержка облученных образцов после облучения составила 1 сутки. Вторая серия измерений проводилась после выдержки от 5 до 10 суток. И заключительная, третья серия измерений проводилась после выдержки образцов от 25 до 30 суток.

В результате ИНАА определено содержание 27 элементов в образцах бетона М8-В. Для четырех элементов – As, Ga, Ni, Sb полученные значения их содержания в образцах бетона М8-В, сравнимы с погрешностями их определения. Анализ полученных результатов элементного состава бетона М8 позволяет сделать вывод о том, что состав верхней и нижней частей блока М8-В в целом аналогичен с некоторыми различиями. Различия наблюдаются в содержании урана. Определено содержание элементов в бетоне М8В, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку в помещениях при декомиссии ИТЭР (в скобках приведена погрешность определения) - Cs – 1,3 ($\pm 0,2$) мг/кг, Eu – 0,54 ($\pm 0,09$) мг/кг, Sm – 2,2 ($\pm 0,35$) мг/кг, Ta – 1,7 ($\pm 0,3$) мг/кг, Tb – 0,32 ($\pm 0,04$) мг/кг.

Для элементов-аналитов As, Ga, Ni, Sb полученные значения их содержания в образце бетона М8В (с использованием и того, и другого детектора), сравнимы с погрешностями их определения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен инструментальный нейтронно-активационный анализ образцов, приготовленных из керна бетона М8В, облучения образцов происходило в исследовательском реакторе ИВГ.1М при флюенсе тепловых нейтронов $5,3 \cdot 10^{16}$ н/см², гамма-спектрометрические измерения проводились при различной выдержки образцов от одних суток до одного месяца.

Проведена обработка результатов гамма-спектрометрических измерений. Рассчитаны концентрации основных и примесных элементов.

Сравнение данных инструментального нейтронно-активационного анализа с аттестованными содержаниями элементов в стандартных образцах показывает их совпадение в пределах стандартного отклонения практически для всех определяемых элементов. Это подтверждает высокую точность полученных результатов к примесям образцов бетона и правильность применения методики ИНАА.

Результаты определения элементного состава верхней и нижней частей блока М8В совпадают с точностью до погрешности определения.

В бетоне марки - М8В определено содержание элементов, которые могут вносить основной вклад в радиационную обстановку при эксплуатации и декомиссии ИТЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фронтасьева М.В. Нейтронно-активационный анализ в науках о жизни // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42. – с. 636–701.
2. Kaytipuly C.J., Westland A.D. Review of methods for the determination of lanthanides in geological samples // Talanta. – 1988. – Т. 35, № 1. – pp. 1–13.
3. Таблица определения химических элементов методом нейтронно-активационного анализа // Изв. АН Каз.ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1980. – № 6. – с. 3–7.
4. Нургалиева Д.Ж., Омарова Н.М., Фронтасьева М.В., Моржухина С.В. Атмосферное выпадение тяжелых металлов на территории Республики Казахстан // ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2018 Международная научно-практическая конференция, 2018. – с. 219–223.
5. I. Yu. Silachyov. Determination of rare earths in uranium raw material by neutron activation analysis and X-ray fluorescence // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan-Series Chemistry and Technology. – 2018 – V 3, № 429, pp. 28 – 38.
6. Rajmund S. Dybczyński. The role of NAA in securing the accuracy of analytical results in the inorganic trace analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2019, Vol 322, Issue 3, pp. 1505–1515.
7. Wael M., Badawy Khaled Ali, Hussein M, El-Samman, Marina V. Frontasyeva, Svetlana F. Gundorina, Octavian G. Dului. Instrumental neutron activation analysis of soil and sediment samples from Siwa Oasis, Egypt // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2015, Vol 12, Issue 4, pp. 637–644.
8. Робертус Юрий Владимирович, Рихванов Леонид Петрович, Ситникова Валентина Александровна, Савенко Ксения Сергеевна, Большунова Татьяна Сергеевна Элементный состав лишайника на шифере как биоиндикатор загрязнения атмосферы агломерации г. Горно-Алтайска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018, Т 329. – №4. – с. 70-78.
9. Данилова Е.А., Хайдарова М.М., Шамсиев Ф.М., Киста.А., Осинская Н.С. Оценка эффективности витаминно-минерального комплекса "Лайфпак юниор" методом нейтронно-активационного анализа в лечении детей с заболеваниями органов дыхания // Медицинская физика. – 2009, Т 42. – №:4. – с. 53-56.
10. Былкин Борис Константинович, Енговатов Игорь Анатольевич, Кожевников Алексей Николаевич, Синюшин Дмитрий Константинович. Банк данных по активационным характеристикам бетонов радиационной защиты ядерных установок // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Выпуск 2(113). – с. 213-221.
11. Методические указания по подготовке проб минерального сырья для инструментального нейтронно-активационного анализа: инструкция / ДГП ИАЭ РГП НЯЦ РК; разработчик отдел 240.– Курчатов, 25.12.2012.– 10 с.– Инв. № К-50993.
12. Методика проведения нейтронно-активационного анализа проб минерального сырья с использованием исследовательских реакторов ИВГ.1М и ИГР / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, 13.01.2015.– 12 с.– № К-52121.
13. R. Jacimovic. Comparison of relative INAA and k 0-INAA using soil and sediment reference materials. J Radioanal. Nucl. Chem. – 2014. – Vol. 300. – pp. 663–672
14. А. Кузнецов. Активационный анализ. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974.– с. 344.
15. Practical aspects of operating a neutron activation analysis laboratory. IAEA-TECDOC-564. 1990 г.
16. Брискман Б.А., Генералов В.В., Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С. Внутрореакторная дозиметрия. Практическое руководство. М. Энергоиздат. 1985.
17. Метрология нейтронных измерений на ядерно-физических установках. Материалы I Всесоюзной школы. Том 1 и 2. Под редакцией Васильева Р.Д. М., 1976.– с. 176.
18. Тустановский В.Т. Оценка точности и чувствительности активационного анализа. М.: Атомиздат. 1976.– с. 192.