

# Определение урана, плутония, нептуния и америция в растворах-имитаторах отработавшего ядерного топлива методом атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой

Н. Г. Терентьева<sup>1</sup>, С. А. Тогушаков<sup>1</sup>, Е. И. Резван<sup>1</sup>, В. А. Терешин<sup>1</sup>

УДК 621.039.59:66.085

Разработана методика для определения массовой концентрации U, Pu, Np и Am в азотнокислых растворах-имитаторах отработавшего ядерного топлива методом атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой без предварительного разделения. Подобраны оптимальные аналитические линии для совместного определения содержания U, Pu, Np и Am. Проведены эксперименты по определению U, Pu, Np и Am в растворах, имитирующих продукты переработки замкнутого ядерного топливного цикла.

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо, атомно-эмиссионная спектроскопия с азотной микроволновой плазмой, уран, плутоний, нептуний, америций, раствор-имитатор

Статья получена 23.09.2021  
Принята к публикации 12.10.2021

## Введение

После отработки уран-плутониевого топлива в проектируемом реакторе на быстрых нейтронах с замкнутым ядерным топливным циклом «Брест-ОД-300» предполагается переработка отработавшего топлива для очистки U, Pu, Np от продуктов деления с целью возможного использования конечных продуктов очистки для возврата в топливный цикл. В состав отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) входят U, Pu, Np, Am и примесные элементы радионуклидов редкоземельных актинидов и младших актинидов ядерного топлива [1].

Для определения степени возврата ядерных материалов (ЯМ) в топливный цикл на всех этапах переработки ОЯТ в точках аналитического контроля требуется проводить определение U, Pu, Np и Am.

Содержание U, Pu, Np, Am относится к основным показателям качества смешанных оксидов урана и плутония, направляемых на рефабрикацию топлива, и ведущим критерием для классификации радиоактивных отходов с целью дальнейшего извлечения актиноидов и их переработки.

На сегодняшний день накоплен большой опыт определения U, Pu, Np, Am в азотнокислых растворах отработавшего ядерного топлива радиометрическими, титриметрическими, спектрофотометрическими, альфа-,

<sup>1</sup> АО «Сибирский химический комбинат», 636039, г. Северск  
Томской обл., ул. Курчатова, д. 1, Россия, shk@atomsib.ru.

гамма-спектрометрическими, рентгенофлуоресцентными и масс-спектрометрическими методами.

Наряду с перечисленными методами анализа определение актиноидов с помощью атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) имеет определенные преимущества и области применения при проведении аналитического контроля продуктов переработки ОЯТ.

Настоящая работа посвящена изучению возможности определения массовой концентрации U, Pu, Np, Am в растворах-имитаторах продуктов переработки ОЯТ на атомно-эмиссионном спектрометре с азотной микроволновой плазмой. Работа проводилась на площадке АО «Сибирский химический комбинат» в рамках подготовки методического и приборного обеспечения проектируемой аналитической лаборатории модуля переработки смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего ядерного топлива, создаваемого в составе опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК).

В качестве основных критериев выбора атомно-эмиссионной спектроскопии для аналитического обеспечения модуля переработки ОЯТ были приняты: возможность проведения измерений в растворах, содержащих после пробоподготовки катионы металлов в концентрациях от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$  г/дм<sup>3</sup>; отсутствие больших объемов радиоактивных отходов, образующихся в ходе проведения измерений; экспрессность и простота проведения измерений; высокая точность результатов измерений.

Наиболее целесообразно использовать метод атомно-эмиссионной спектроскопии для проб, содержащих до 5 г/дм<sup>3</sup> U, Pu, Np, Am и полный состав примесных элементов (металлов: Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, W, Fe, Ni, Al, V, Ga, Co, Mg, Mn, Cu, Pb, Sb, Cs, Sr, Sn, Ba, Mo, Zr, Rb, Rh, Pd, Ru, Ag, Tc, Cd, Ta, Cr, и не металлов: Te, Se, B, Si, P, F), остатки органических молекул (восстановителей, комплексообразователей и экстрагентов).

Ранее проводились исследования по определению актиноидов методом АЭС. В работе [2] указывается на возможность определения содержания урана методом АЭС с нижним пределом определения  $2 \cdot 10^{-4}$  г/дм<sup>3</sup> в растворах, содержащих уран и примеси РЗЭ.

В работе [3] показаны преимущества определения содержания америция в растворах МОКС-топлива методом АЭС по сравнению с масс-спектрометрическим методом. Так как Am-241 и Pu-241 имеют одинаковые соотношения массы к заряду, определения содержания данных элементов масс-спектрометрическим методом возможно только после предварительного разделения

америция и плутония друг от друга. Применение метода АЭС позволяет определять Am-241 и Pu-241 при одновременном присутствии, так как каждый из этих элементов имеет свой собственный характеристический спектр излучения.

В работе [4] достаточно полно изучена возможность определения изотопов Pu-239 и Pu-240 методом АЭС в азотнокислых растворах плутония, полученных из образцов с заданным изотопным составом.

В [5] приведены характеристические эмиссионные линии для определения содержания нептуния в азотнокислых растворах Np.

Обзор публикаций показал, что проведенные ранее исследования были связаны с определением одного-двух элементов и не учитывали сложный матричный состав, аналогичный продуктам переработки ОЯТ смешанного уран-плутониевого топлива.

Цель работы состояла в изучении возможности определения U, Pu, Np, Am в продуктах переработки отработавшего ядерного топлива.

После изучения результатов исследований, опубликованных ранее в [2–4], проведена оценка возможности одновременного определения U, Pu, Np, Am без предварительного разделения с учетом их взаимного влияния. Все эксперименты проводили на растворах-имитаторах, содержащих U, Pu, Np, Am и редкоземельные элементы.

## Характеристики используемого метода и оборудования

Используемый для проведения исследований метод атомно-эмиссионной спектроскопии основан на измерении интенсивности излучения атомов элементов при распылении мелкодисперсного аэрозоля пробы в высокотемпературную плазму.

Электроны в атомах, получившие достаточное количество энергии, переходят на более высокие энергетические уровни, и обратный переход сопровождается выделением энергии в виде электромагнитного излучения. Атом каждого элемента излучает на строго определенных длинах волн, то есть каждый элемент имеет собственный свойственный только ему характеристический спектр.

Работы проводились на атомно-эмиссионном спектральном комплексе «Гранд-СВЧ» производства ООО «ВМК-Оптоэлектроника» (г. Новосибирск) с источником возбуждения спектров на основе азотной микроволновой плазмы, возбуждаемой СВЧ-полем (2,45 ГГц) с температурой ~5000 °С [7]. Для уменьшения негативного воздействия радионуклидов на оборудование: СВЧ-резонатор и систему ввода пробы – трехщелевую кварцевую горелку

Таблица 1. Состав градуировочных растворов

| Элементы, входящие в состав                | Массовая концентрация в градуировочных растворах, г/дм <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| U                                          | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-2}$                                 |
| Pu                                         | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$                                 |
| Np                                         | $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$                                 |
| Am                                         | $1 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-3}$                                 |
| Суммарная концентрация примесных элементов | $6 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-2}$                                 |

30-807-0552 (Glass Expansion, Австралия), распылительную камеру ML180022 (Meinhard, США), пневматический распылитель TR-50-A1 (Meinhard, США), трехканальный перистальтический насос размещали в металлическом перчаточном боксе. СВЧ-магнетрон располагался под боксом и соединялся с резонатором через волновод, герметично запаенный полимерным материалом. Горелку устанавливали в специальный быстросъемный зажим типа «шаттл». В измерениях использовали аксиальный/осевой

способ обзора плазмы с горизонтально расположенной горелкой.

Для регистрации излучения использовали два параллельно работающих полихроматора, построенных по схеме Пашена – Рунге с неклассическими вогнутыми дифракционными решетками 2400 и 900 штр./мм со скомпенсированным астигматизмом.

Рабочий спектральный диапазон спектрометра «Гранд-СВЧ» составлял 190–780 нм с разрешением 10 пм в области 190–350 нм (первый полихроматор) и 30 пм в области 350–780 нм (второй полихроматор). Спектр во всем рабочем спектральном диапазоне 190–780 нм регистрировался со временем базовой экспозиции от 2 мс и выше.

Перед проведением измерений был выбран аксиальный способ наблюдения плазмы (нулевое положение от оптической оси) и установлены следующие параметры работы атомно-эмиссионного спектрометра:

- мощность, подводимая к плазме – 1350 Вт;
- охлаждающий поток азота – 12 дм<sup>3</sup>/мин;
- промежуточный поток азота – 0,5 дм<sup>3</sup>/мин;
- поток азота распылителя – 0,4 дм<sup>3</sup>/мин;

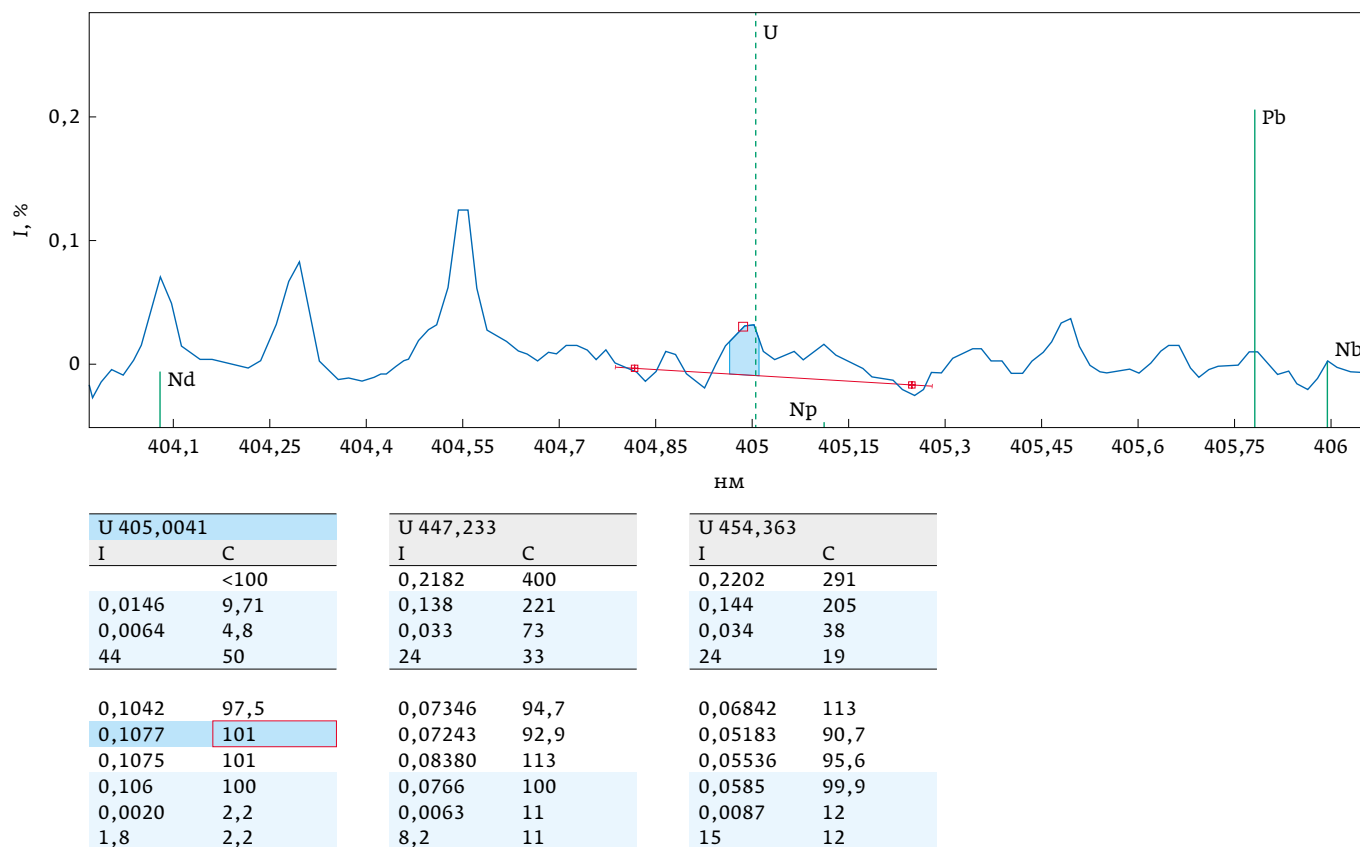


Рис. 1. Эмиссионные линии урана

- время стабилизации плазмы до измерения спектра – 10 с;
- время измерения одной пробы с пятью повторениями – 50 с;
- время промывки системы подачи пробы – 15 с;
- скорость вращения перистальтического насоса/анализ – 20 об./мин;
- скорость вращения перистальтического насоса/промывка – 80 об./мин.

## Экспериментальная часть

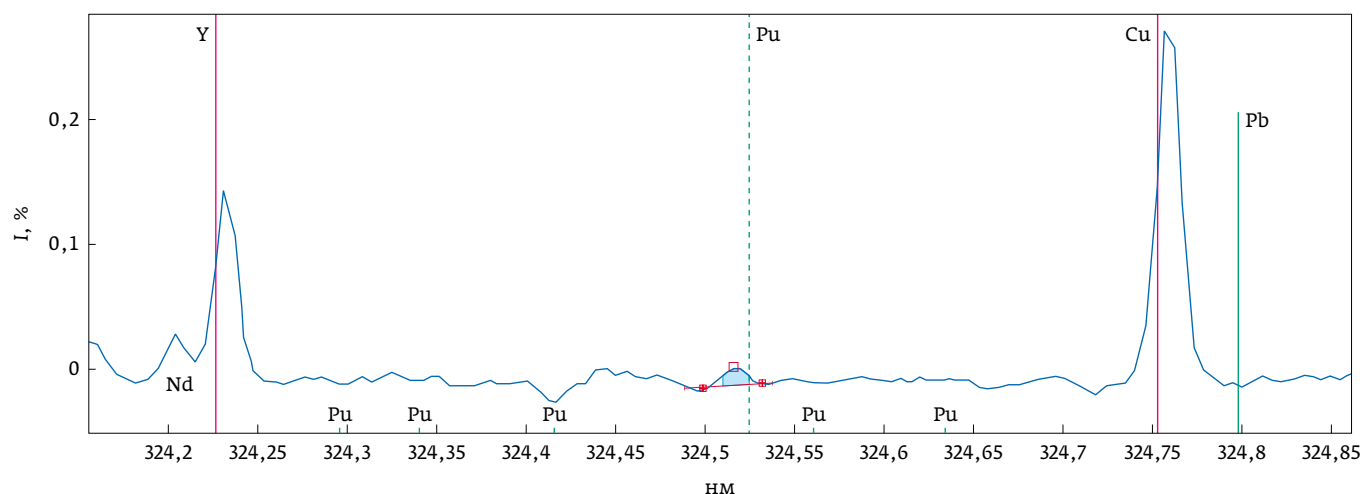
Для приготовления градуировочных растворов и определения нижней границы определяемых содержаний для актиноидов использовали аттестованные смеси U, приготовленные из государственного стандартного образца ГСО 8363-2003, аттестованные смеси Pu, Np, Am, приготовленные из образцовых растворов радионуклидов Pu-239, Np-237, Am-243 производства АО «Радиовый институт им. В.Г. Хлопина», а также растворы примесных элементов – имитаторов продуктов деления. В качестве имитаторов продуктов деления ОЯТ использовали многоэлементные смеси стабильных

изотопов (МЭС-1 СОП-15616-2014, МЭС-2 СОП-15616-2014, МЭС-3 СОП-15616-2014, МЭС-4 СОП-15617-2014, МЭС-РЗЭ (ООО НПП «Скат», Россия), ICP-MS-68A-C и Cs (МСО 1060:2004). Для приготовления растворов применяли азотную кислоту квалификации ос. ч. и деионизованную воду с удельным сопротивлением  $\geq 18$  МОм/см. В работе использовали технический газообразный азот марки 1 сорта по ГОСТ 9293 с массовой долей не менее 99,6%.

Для градуировки приготовили три серии по семь градуировочных растворов, содержащих U, Pu, Np, Am, а также примесные элементы – имитаторы продуктов деления. Концентрацию плутония, нептуния и америция в градуировочных растворах последовательно увеличивали от  $10^{-5}$  г/дм<sup>3</sup> до  $10^{-3}$  г/дм<sup>3</sup> с шагом в 2,5 раза. Концентрацию урана в градуировочных растворах последовательно увеличивали от  $10^{-5}$  г/дм<sup>3</sup> до  $10^{-2}$  г/дм<sup>3</sup> с шагом в три раза.

Данные по составу градуировочных растворов представлены в табл. 1.

Градуировочные растворы использовались свежеприготовленными. Для построения градуировочных графиков брали данные пяти параллельных определений.



| Pu 278,448 |      | Pu 295,446 |      | Pu 297,250            |       | Pu 299,640 |       | Pu 324,525 |       | Pu 444,165 |      |
|------------|------|------------|------|-----------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|------|
| I          | C    | I          | C    | I                     | C     | I          | C     | I          | C     | I          | C    |
| 0,04868    | 6340 | 0,0243     | 1960 | 0,7546                | 399   | 0,4442     | 19600 |            | <70,0 | 0,2985     | 908  |
| 0,0597     | 3200 |            |      | 0,715                 | 394   | 0,411      | 17100 |            |       | 0,207      | 430  |
| 16         | 50   |            |      | 0,022                 | 2,8   | 0,031      | 2300  |            |       | 0,041      | 200  |
|            |      |            |      | 3,0                   | 0,71  | 7,5        | 13    |            |       | 20         | 47   |
| 0,01104    | 26,3 | 0,01413    | 79,6 | $6,262 \cdot 10^{-5}$ | 43,5  | 0,02026    | 80,5  | 0,06675    | 71,3  | 0,07159    | 42,4 |
| 0,01665    | 115  | 0,008141   | 3,05 |                       | <70,0 | 0,01482    | 46,1  | 0,06062    | 64,3  | 0,09921    | 85,3 |
| 0,01583    | 95,6 | 0,01920    | 490  | 0,00087               | 81    | 0,02112    | 86,7  | 0,06955    | 74,5  | 0,1006     | 87,9 |
| 0,0145     | 78,9 | 0,0138     | 191  | 0,000471              | 62,3  | 0,0187     | 71,1  | 0,0656     | 70,0  | 0,0905     | 71,9 |
| 0,0030     | 47   | 0,0055     | 260  | 0,00058               | 27    | 0,0034     | 22    | 0,0046     | 5,2   | 0,016      | 26   |
| 21         | 59   | 40         | 140  | 120                   | 43    | 18         | 31    | 7,0        | 74    | 18         | 36   |

Рис. 2. Эмиссионные линии плутония

В ходе исследований с помощью программного обеспечения «Атом» определены наиболее чувствительные эмиссионные линии актиноидов. На рис. 1–4 представлены основные и вспомогательные линии спектров U, Pu, Np, Am.

Наиболее чувствительные аналитические линии U, Pu, Np, Am представлены в табл. 2.

## Определение содержания продуктов деления и примесных элементов в растворах-имитаторах

Чтобы изучить возможность определения актиноидов на атомно-эмиссионном спектрометре, исходя из предполагаемого состава продуктов переработки ОЯТ, были подготовлены два раствора-имитатора. Состав растворов имитаторов включал: рабочий раствор плутония, полученный при разработке технологии переработки ОЯТ; растворы урана, приготовленные из ГСО урана 8363-2003; аттестованные смеси Np и Am, приготовленные из образцовых растворов радионуклидов Np-237, Am-243 производства АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»; растворы примесных элементов – имитаторов

Таблица 2. Наиболее чувствительные аналитические линии актиноидов

| Элемент | Наиболее чувствительные аналитические линии, нм |
|---------|-------------------------------------------------|
| U       | 405,00; 447,23                                  |
| Pu      | 299,64; 278,45; 297,25; 450,49                  |
| Np      | 456,04; 405,11                                  |
| Am      | 408,93; 283,23                                  |

продуктов деления из многоэлементных смесей (МЭС). Массовая концентрация плутония в рабочем растворе плутония была определена масс-спектрометрическим методом с относительной погрешностью измерений не более 1%.

В растворах-имитаторах были проведены определения массовой концентрации актиноидов по пяти параллельным определениям. После работы с каждым раствором-имитатором проводили контрольные определения элементов в градуировочных растворах, соответствующих середине градуировочного графика.

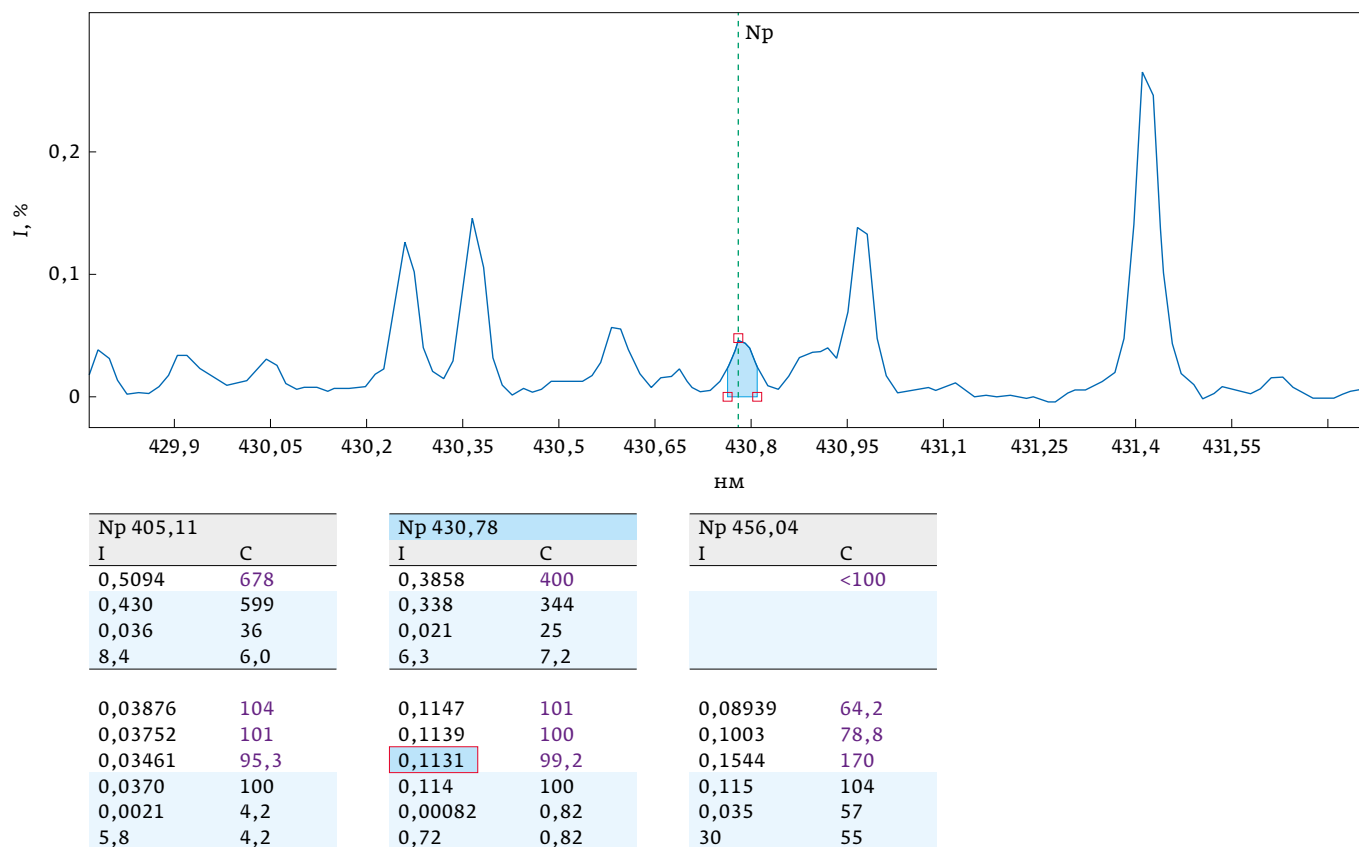


Рис. 3. Эмиссионные линии нептуния

**Таблица 3.** Расчетный состав и результаты измерений содержания актиноидов в растворах-имитаторах № 1–3

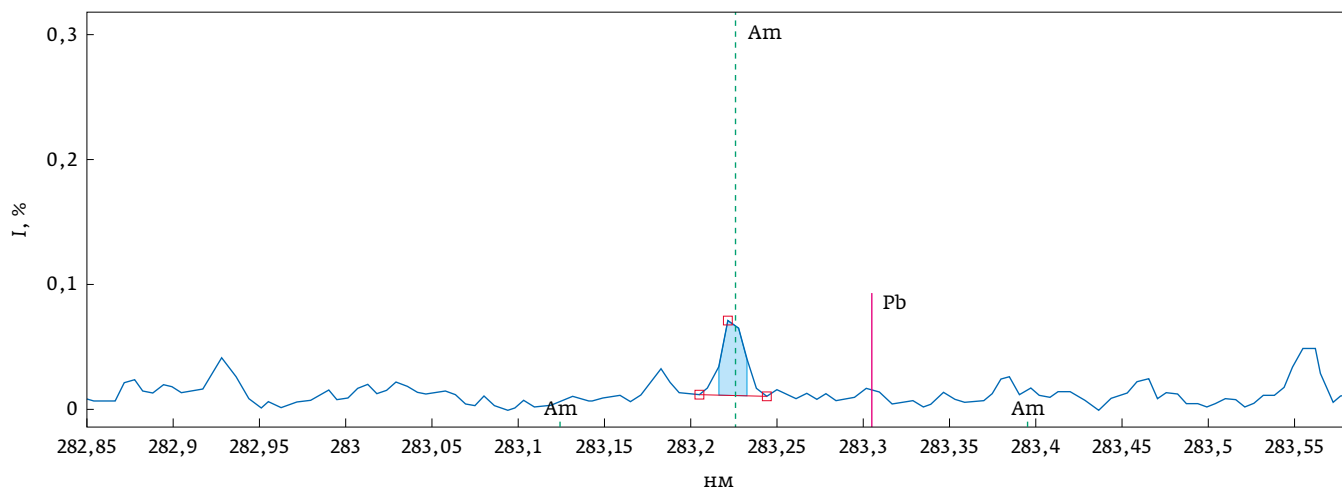
| Элемент                    | Массовая концентрация элемента, г/дм <sup>3</sup> |                      |                      |                      |                      |                      |
|----------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                            | Имитатор № 1                                      |                      | Имитатор № 2         |                      | Имитатор № 3         |                      |
|                            | расчетная                                         | измеренная           | расчетная            | измеренная           | расчетная            | измеренная           |
| U                          | $2,00 \cdot 10^{-4}$                              | $2,02 \cdot 10^{-4}$ | $5,00 \cdot 10^{-2}$ | $5,02 \cdot 10^{-2}$ | $1,00 \cdot 10^{-4}$ | $9,90 \cdot 10^{-5}$ |
| Pu                         | $7,00 \cdot 10^{-5}$                              | $7,80 \cdot 10^{-5}$ | $4,80 \cdot 10^{-3}$ | $3,61 \cdot 10^{-3}$ | $7,00 \cdot 10^{-5}$ | $7,40 \cdot 10^{-5}$ |
| Np                         | $9,00 \cdot 10^{-5}$                              | $8,90 \cdot 10^{-5}$ | $9,00 \cdot 10^{-5}$ | $8,53 \cdot 10^{-5}$ | $1,00 \cdot 10^{-4}$ | $1,04 \cdot 10^{-4}$ |
| Am                         | $9,50 \cdot 10^{-5}$                              | $8,12 \cdot 10^{-5}$ | $9,50 \cdot 10^{-4}$ | $1,10 \cdot 10^{-3}$ | $6,75 \cdot 10^{-5}$ | $6,80 \cdot 10^{-5}$ |
| Σпримесей                  | 0,02                                              | –                    | 0,06                 | –                    | 0,004                | –                    |
| Σ(U, Pu, Np, Am, примесей) | 0,02                                              | –                    | 0,12                 | –                    | 0,004                | –                    |

Данные по составу растворов-имитаторов продуктов переработки ОЯТ № 1–3 и результаты измерений представлены в табл. 3. Поскольку методика находится на стадии разработки и аттестации, то на сегодняшний день окончательное значение погрешности не определено.

На рис. 5 представлена гистограмма отклонений рассчитанных значений ( $C_{\text{расч.}}$ ) концентраций U, Pu, Np, Am от измеренных ( $C_{\text{измер.}}$ ) в растворах-имитаторах № 1–3.

Из рис. 5 видно, что в растворах-имитаторах № 1 и 3, содержащих сумму U, Pu, Np, Am, примесей не более  $2 \cdot 10^{-2}$  г/дм<sup>3</sup>, отклонения значений измеренных концентраций от расчетных для U, Pu, Np, Am, не превышают 15%. В растворе-имитаторе № 2, содержащем сумму U, Pu, Np, Am, примесей более  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup>, отклонения значений измеренных концентраций от расчетных для Pu и Am превышают 15%.

Содержание суммы U, Pu, Np, Am и примесей более  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup> является критическим, так как



| Am 283,226 |      | Am 289,329 |      | Am 292,059 |      | Am(1) 408,932 |        | Am(2) 408,932 |       | Am 469,970 |       |
|------------|------|------------|------|------------|------|---------------|--------|---------------|-------|------------|-------|
| I          | C    | I          | C    | I          | C    | I             | C      | I             | C     | I          | C     |
| 0,2515     | 203  | 0,2397     | 184  | 0,01387    | 1,06 |               | <67,56 | 0,4596        | 0,460 | 0,1155     | 282   |
| 0,387      | 435  | 0,405      | 387  | 0,0132     | 1,01 |               |        | 0,352         | 0,352 | 0,0820     | 10900 |
| 0,077      | 150  | 0,086      | 110  | 0,0029     | 0,61 |               |        | 0,051         | 0,051 | 0,014      | 12000 |
| 20         | 34   | 21         | 28   | 22         | 60   |               |        | 14            | 14    | 17         | 110   |
| 0,1284     | 63,9 | 0,1092     | 61,1 | 0,06791    | 60,2 | 0,08051       | 72,3   | 0,1053        | 0,105 | 0,1381     | 59,7  |
| 0,1283     | 63,8 | 0,1210     | 70,5 | 0,07115    | 67,7 | 0,06969       | 62,0   | 0,1221        | 0,122 | 0,1288     | 109   |
| 0,1411     | 75,1 | 0,1216     | 71,0 | 0,07409    | 75,1 | 0,07630       | 68,3   | 0,1272        | 0,127 | 0,1416     | 48,1  |
| 0,133      | 67,6 | 0,117      | 67,5 | 0,0711     | 67,7 | 0,0755        | 67,5   | 0,118         | 0,118 | 0,136      | 72,4  |
| 0,0073     | 6,5  | 0,0070     | 5,6  | 0,0031     | 7,5  | 0,0055        | 5,2    | 0,011         | 0,011 | 0,0066     | 33    |
| 5,5        | 9,6  | 5,9        | 8,3  | 4,4        | 11   | 7,2           | 7,7    | 9,7           | 9,7   | 4,9        | 45    |

**Рис. 4.** Эмиссионные линии америция

аэрозоль, поступающий в плазму спектрометра, становится более плотным и это может привести к усилению матричных эффектов и спектральным наложениям. Поэтому при минерализации пробы более  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup> требуется проводить предварительное разбавление.

Таким образом, метод атомно-эмиссионной спектроскопии с азотной микроволновой плазмой наряду с другими может использоваться для определения актиноидов в продуктах переработки ОЯТ. Предложенный способ позволяет проводить прямые определения актиноидов в растворах, содержащих сумму U, Pu, Np, Am до  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup> или в технологических пробах в более высоких концентрациях после предварительного разбавления. При градуировке атомно-эмиссионного спектрометра необходимо учитывать состав предполагаемой матрицы. Актиноиды в вышеуказанном диапазоне могут определяться одновременно с примесными элементами продуктов распада (Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, W, Fe, Ni, Al, V, Ga, Co, Mn, Cu, Pb, Sb, Sn, Ba, Mo, Zr, Rb, Rh, Pd, Ru, Ag, Tc, Cd, Ta, B, Cs) [6].

## Выводы

Показана возможность одновременного определения U, Pu, Np, Am без предварительного разделения в растворах, имитирующих продукты отработавшего ядерного топлива методом атомно-эмиссионной спектроскопии в диапазонах:

- от  $10^{-5}$  до  $10^{-2}$  г/дм<sup>3</sup> без предварительного разбавления;
- от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup> после предварительного разбавления в 10 раз;
- от  $10^{-3}$  до 1 г/дм<sup>3</sup> после предварительного разбавления в 100 раз.

Суммарное содержание актиноидов и примесей в пробе, поступающей в виде мелкодисперсного аэрозоля в высокотемпературную плазму не должно превышать  $10^{-1}$  г/дм<sup>3</sup>.

Работа выполнена при финансировании в рамках проекта «Прорыв».

## Литература

1. Шведов В. П., Седов В. М., Рыбальченко И. Л., Власов И. Н. Ядерная технология. М.: Атомиздат, 1979. 123 с.
2. Сентупта А., Адия В. К., Годбол С. В. Изучение спектрального наложения урана на другие анализируемые вещества с использованием АЭС-ИСП на основе CCD. Журнал радиоаналитики и ядерной химии. 2013;298(2):1117–1125. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2520-0>.
3. Краклер М., Альварез-Сарандес Р., Ван Винкел С. Элементный и изотопный анализ америция в неразделенном

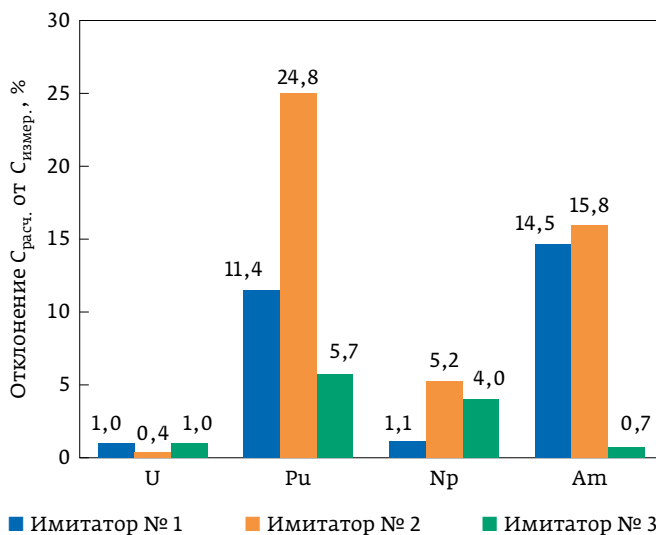


Рис. 5. Отклонения рассчитанных значений концентраций U, Pu, Np, Am от измеренных в растворах-имитаторах

отработавшем топливе с использованием ОЭС-ИСП высокого разрешения и магнито-секторной МС-ИСП. Журнал аналитической атомной спектроскопии. 2014;(29):817–824. <https://doi.org/10.1039/c4ja00068d>.

4. Эдельсон М. К., ДеКальб Е. Л., Виндж Р. К., Фоссель В. А. Аналитическая атомная спектроскопия плутония-I. Спектр плутония высокого разрешения, возбуждаемый индуктивно-связанной плазмой. Журнал спектроскопии. 1986;41B(5):475–486.
5. ДеКальб Е. Л., Эдельсон М. К. Атлас атомных спектральных линий нептуния, возбуждаемых индуктивно-связанной плазмой. 1987. 136 с. <https://doi.org/10.2172/1028806>.
6. Терентьева Н. Г., Тогушаков С. А., Ширйкалова О. А. Определение продуктов деления и примесей в растворах-имитаторах отработавшего ядерного топлива методом атомно-эмиссионной спектроскопии. АНАЛИТИКА. 2020;(6):490–496 <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2020.10.6.490.496>.

## References

1. Svedov V. P., Sedov V. M., Rybalchenko I. L., Vlasov I. N. Nuclear technology. Moscow, Atomizdat, 1979. 123 p. (In Russ.).
2. Sengupta A., Adya V. C., Godbole S. V. Spectral interference study of uranium on other analytes by using CCD based ICP-AES. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry. 2013;298(2):1117–1125. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2520-0>.
3. Krachler M., Alvarez-Sarandés R., Van Winckel S. Elemental and isotopic analysis of americium in non-separated spent fuels using high resolution ICP-OES and sector field ICP-MS. J. Anal. At. Spectrom. 2014;(29):817–824. <https://doi.org/10.1039/c4ja00068d>.
4. Edelson M. C., DeKalb E. L., Winge R. K., Fassel V. A. Analytical atomic spectroscopy of plutonium-I. High resolution spectra of plutonium emitted in an inductively coupled plasma. Spectrochimica Acta. 1986;41B(5):475–486.
5. DeKalb E. L., Edelson M. C. Atlas of atomic spectral lines of neptunium emitted by an inductively coupled plasma. 1987. 136 p. <https://doi.org/10.2172/1028806>.
6. Terentyeva N. G., Togushakov S. A., Shirikalova O. A. Determination of fission products and impurity elements in solutions simulators of spent nuclear fuel by atomic emission spectrometry. Analytica. 2020;(6):490–496 <https://doi.org/10.22184/2227-572X.2020.10.6.490.496>. (in Russ.)

# Testing&Control

**26–28 октября 2021**  
МВЦ «Крокус Экспо»

Самая крупная в России международная  
выставка испытательного и контрольно-  
измерительного оборудования



[www.testing-control.ru](http://www.testing-control.ru)



Измерительное  
и метрологическое  
оборудование



Оборудование  
для лабораторного  
контроля



Испытательное  
оборудование



Оборудование  
для неразрушающего  
контроля и технической  
диагностики



Производственный  
контроль и машинное  
зрение



Системы диагностики  
и мониторинга

**Подробности на сайте**  
[www.testing-control.ru](http://www.testing-control.ru)

Организатор



Международная  
Выставочная  
Компания

+7 (495) 252 11 07  
[control@mvk.ru](mailto:control@mvk.ru)