

АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ПОЧВЕ С СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

И.О. Зверева, В.В. Каширский, А.Н. Шатров

Институт радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра РК, г. Курчатов, Казахстан

Представлены результаты работы по определению оптимальных условий химического вскрытия образцов; описаны решения по минимизации потерь целевого радионуклида в процессе химического разделения; экспериментально определены и устранены факторы, влияющие на полноту осаждения изотопов плутония.

Ключевые слова: радиоэкология, Семипалатинский испытательный полигон (СИП), ядерные испытания, техногенные радионуклиды, хроматографические методы, электрохимическое осаждение

Adaptation of the Method of Radiochemical Determination of Plutonium Isotopes in Soil from the Semipalatinsk Test Site

I.O. Zvereva, V.V. Kashirsky, A.N. Shatrov

Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 071100 Kurchatov, Kazakhstan

Presents the results of work to determine the optimal conditions for chemical extraction of samples; solutions are described to minimize the loss of the target radionuclide in the process of chemical separation; the factors influencing the completeness of plutonium isotope precipitation were experimentally determined and eliminated.

Keywords: radioecology, Semipalatinsk test site (STS), nuclear tests, man-made radionuclides, chromatographic methods, electrochemical deposition

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-09-36-41

Мониторинг выбросов радиационно-опасных предприятий — одна из актуальных и одновременно сложных и, что немаловажно, затратных задач в процессе оценки дозовых нагрузок на персонал и население, а также влияния на радиоэкологическую ситуацию прилегающих территорий. При аварийных ситуациях качественный анализ трансурановых элементов позволяет определить возможные последствия и избежать их [1].

Плутоний и другие долгоживущие трансурановые эле-

менты распадаются с излучением альфа-частиц, обладающих очень небольшой проникающей способностью. Энергия альфа-частиц плутония составляет 5 МэВ и в воздухе они проходят лишь 3–5 см. Они не могут проникнуть ни через лист бумаги, ни через полиэтиленовую пленку, ни даже через кожу человека. Однако, попав в организм человека, плутоний может вызвать острые или хронические проблемы со здоровьем, а поскольку период полураспада плутония составляет 24 400 лет, важно как

можно лучше изолировать его от окружающей среды [2].

Особенность плутония по сравнению с другими элементами заключается в том, что его окислительно-восстановительные потенциалы, соответствующие четырем основным состояниям окисления в кислом растворе (III–VI), очень близки между собой и составляют ~1 В, как это можно увидеть на рис. 1. Поэтому катионы плутония легко вступают в реакцию диспропорционирования, при которой два взаимодействующих иона в одном и том же состоянии окис-

ления одновременно окисляются и восстанавливаются с образованием более высокого и более низкого состояния. И наоборот, при некоторых условиях два иона плутония разных состояний окисления могут вступать в реакцию репропорционирования, в результате чего два иона одновременно окисляются и восстанавливаются с образованием двух ионов одного и того же состояния окисления. Это является необычным, и из-за этого химическое поведение растворов плутония становится особенно сложным и удивительным [3].

Чтобы понять сложную химию изотопов плутония и количественно определить их содержание в объектах окружающей среды существует ряд спектрометрических методов. Для определения активности альфа-излучающих трансурановых радионуклидов применяются методы альфа-спектрометрии с радиохимической подготовкой образцов [4].

Наиболее важным фактором, влияющим на качество результатов в альфа-спектрометрии, является подготовка образца. В процессе пробоподготовки изучаемый радионуклид выделяется из образца химическими методами и закрепляется тонким равномерным слоем для получения качественного аналитического спектра [5].

Подготовка образца для альфа-спектрометрии включает следующие основные этапы: предварительная обработка, химическая очистка и разделение, изготовление счетного образца/источника [6].

Главной проблемой, возникшей при изучении радионуклидного загрязнения Семипалатинского испытательного полигона (СИП), стало наличие труднорастворимых частиц. Цель настоящей работы — усовершенствовать методы определения изотопов плутония с предварительной радиохимической подготовкой в почве СИП (рис. 2, а).

Экспериментальная часть

Объект исследования — почва, отобранная с мест про-

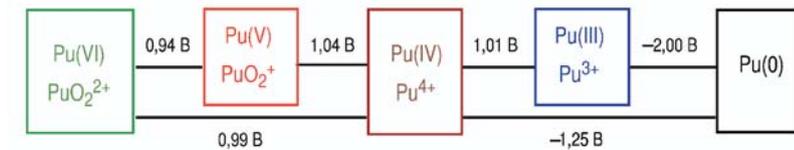


Рис. 1. Окислительно-восстановительные потенциалы акваионов плутония в кислом растворе

Fig. 1. Redox potentials of plutonium aquaions in acidic solution

ведения подземных и наземных ядерных испытаний на площадке "Опытное поле" (рис. 2, б).

Площадка "Опытное поле" предназначалась для проведения атмосферных (воздушных и наземных) ядерных испытаний. Она представляет собой равнину диаметром примерно 20 км. Всего на "Опытном поле" было проведено 116 ядерных испытаний, из них 86 — воздушных и 30 — наземных.

Определение оптимальных параметров стадии вскрытия образца. Отобранные пробы почвы массой не менее 1 кг просушивались на воздухе. Влажные почвы сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 3–6 ч. Воздушно-сухие образцы просеивали через сито с отверстиями диаметром 1 мм. Методом квартования отбирали образец массой 200 г и истирали на дисковой мельнице "Pulverisette 9" (Германия) (гарнитура закаленная сталь) в течение 20 мин со скоростью вращения 1000 мин⁻¹. Повторно отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования навеску 50 г и дополнительно истирали в течение 20 мин. Далее отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования конечную навеску. Разрушение органической части образцов проводили озолением в муфельной печи при 400–600 °С в течение 8 ч. Пробы распараллеливались на 3 образца по 5 г для каждого рассматриваемого метода вскрытия образцов.

В данной работе применяли три метода разрушения матрицы почвы для извлечения радионуклидов: выщелачивание, кислотное вскрытие и полное кислотное разложение. Краткое описание содержания опе-

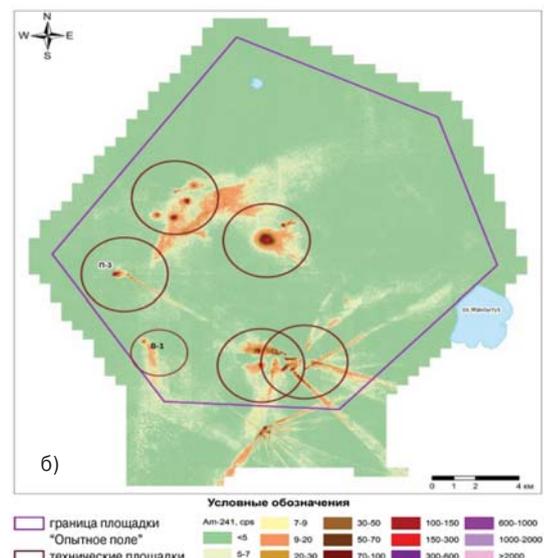
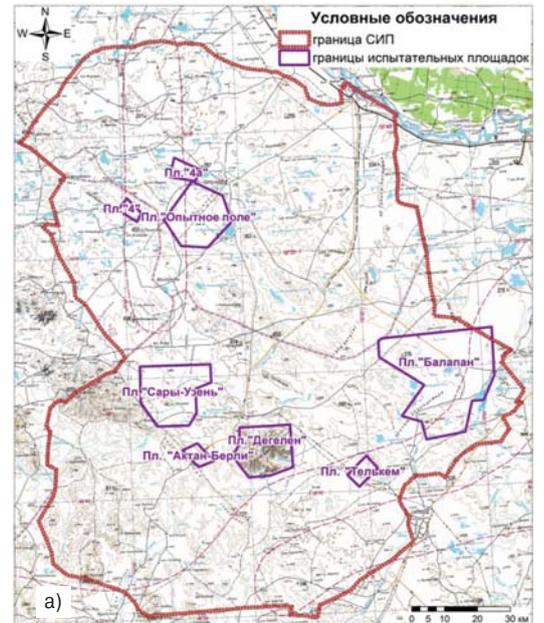


Рис. 2. Карта Семипалатинского испытательного полигона (СИП) (а) и испытательная площадка "Опытное поле" (б)

Fig. 2. Map of the Semipalatinsk test site (SIP) (a) and the test site "Experimental Field" (b)

раций для каждого метода приведено в табл. 1.

Экспериментальная оценка эффективности методов разрушения матрицы образцов проводилась гамма-спектрометрическим методом с помощью пря-

Таблица 1. Методы вскрытия образцов почвы
Table 1. Methods of opening soil samples

Метод	Описание
Выщелачивание	К 5 г озоленного образца прилить 50 мл 7,5 М HNO ₃ , нагревать 50 мин (t=60÷90 °С) с добавлением 3–5 мл H ₂ O ₂ каждые 15 мин. Отделить осадок методом фильтрования. Далее к осадку добавить 50 мл 7,5 М HNO ₃ . Нагреть 50 мин (t= 60÷90 °С) с добавлением 3–5 мл H ₂ O ₂ каждые 15 мин. Отделить осадок методом фильтрования
Кислотное вскрытие	К 5 г озоленного образца прилить 20 мл HF. Нагреть 80 мин с добавлением через каждые 10 мин 3–5 мл HNO ₃ . Выпаривать до полусухого осадка. Добавить 90–100 мл кипящего раствора 9,0–9,5 М HNO ₃ . Отделить осадок методом фильтрования. Далее осадок обработать 10 мл 7,5 М HNO ₃ с добавлением 1 мл H ₂ O ₂ . Отделить осадок методом фильтрования. Далее выпарить выщелат до начала выпадения солей, добавить разб. HNO ₃ до концентрации целевого раствора 7,5–7,7 М + 0,5 г H ₃ BO ₃ . Нагреть 5–7 мин при t= 60÷90 °С. Отделить осадок методом фильтрования
Полное кислотное разложение	К 5 г озоленного образца прилить 30 мл HF. Выпарить до сухого остатка. Далее прилить следующую порцию HF – 30 мл. Выпарить до сухого остатка. Затем прилить 40 мл смеси HF:HNO ₃ (3:1). Выпарить до сухого остатка. Прилить HCl с 0,5 г H ₃ BO ₃ . Выпарить до полусухих солей. Затем прилить 50 мл HNO ₃ с добавлением 1 мл H ₂ O ₂ . Выпаривать до полусухих солей. Далее прилить 50 мл 7,5 М HNO ₃ , перенести в коническую колбу. Обмыть стакан 50 мл обмывочного раствора 7,5 М HNO ₃ . И затем кипятить в течении 5 мин с 0,2 г H ₃ BO ₃

Таблица 2. Удельная активность после вскрытия образцов почвы П1-П3
Table 2. Specific activity after opening soil samples P1-P3

Удельная активность ²³⁹ Pu до вскрытия, Бк/кг	Удельная активность после вскрытия образцов, Бк/кг		
	Выщелачивание	Кислотное вскрытие	Полное кислотное разложение
3,4·10 ⁴ ±0,7·10 ⁴	1,3·10 ⁴ ±0,3·10 ⁴	2,1·10 ⁴ ±0,4·10 ⁴	3,2·10 ⁴ ±0,7·10 ⁴
4,5·10 ⁵ ±0,9·10 ⁵	1,4·10 ⁵ ±0,3·10 ⁵	2,7·10 ⁵ ±0,4·10 ⁵	4,3·10 ⁵ ±0,9·10 ⁵
3,1·10 ⁴ ± 0,7·10 ⁴	1,3·10 ⁴ ±0,3·10 ⁴	2,0·10 ⁴ ±0,4·10 ⁴	3,0·10 ⁴ ± 0,7·10 ⁴

мого исследования растворов на гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором из сверхчистого германия (BE3830, Canberra, США) (табл. 2).

Таким образом, результаты исследования показали, что эффективность извлечения изотопов плутония из образцов при использовании метода полного кислотного разложения в 2 раза выше по сравнению с рассмотренными. Этот факт можно объяснить природой образца и формами нахождения в нем радионуклидов. В объектах с СИП зачастую целевые радионуклиды находятся в виде труднорастворимых соединений PuO₂ [7].

Определение оптимальных параметров стадии химического разделения и выделения изотопов плутония. При количественном концентрировании изотопов плутония из полученных растворов, разделении и очистке от сопутствующих элементов (уран, торий, актиний, щелочные и

щелочноземельные металлы, железо, алюминий, кремний и др.), присутствующих в почве в значительных количествах, используются методы соосаждения, сорбции на ионитах и комплексообразующих сорбентах, экстракции и экстракционной хроматографии [8].

При проведении экстракции предполагается, что радионуклид находится в водной фазе в ионном состоянии. Метод экстракции не пригоден для выделения изотопов плутония из коллоидных растворов и суспензий, в которых присутствуют сложные органические соединения [9].

Наиболее эффективными и популярными способами химического разделения и выделения являются ионнообменные методы. Они могут применяться в статическом и динамическом (колоночном) вариантах. Последний является более удобным и наиболее часто используемым методом [10].

Ионообменные методы разделения элементов заключаются в селективном поглощении ионов из раствора путем обмена их с ионами активных групп ионита и последующем вымывании (десорбции) ионов с ионнообменника.

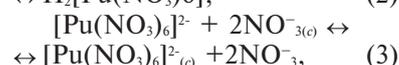
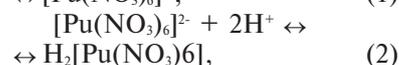
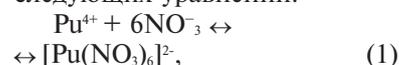
Органические ионообменные смолы представляют собой химические стойкие нерастворимые пространственные сополимеры, к которым прочно присоединены ионогенные группы, способные вступать в реакции обмена с ионами раствора.

Наибольшее распространение получили смолы, являющиеся сополимерами стирола и дивинилбензола. В качестве ионогенных групп в катионитах выступают: фенольная, -COOH, -SO₃H и др.; а в анионитах: аминогруппы, четвертичные аммониевые основания [11].

Для выделения и разделения изотопов плутония чаще всего используют сильнокислотные катиониты, содержащие сульфогруппу (-SO₃H): КУ-2, Dowex-50, Амберлит IR-120; и сильноосновные аниониты, имеющие в составе четвертичные аминогруппы: АВ-17, Dowex-1-2, BioRad AG 1, Амберлит IR-400, Anion Exchange Resin 1-X8 [12].

Благодаря способности Pu(IV) образовывать анионные комплексы анионообменная хроматография является одним из самых широко применяемых методов разделения плутония [13]. В основе разделения плутония на анионообменнике лежит сильная адсорбция анионных комплексов [Pu(NO₃)₆]²⁻, образующихся в HNO₃ среде.

Процессы комплексообразования и сорбции в растворах азотной кислоты могут быть упрощенно записаны в виде следующих уравнений:



где c — фаза ионита.

Максимальная величина коэффициента распределения K_d в растворах азотной кислоты достигается при кислотности $\sim 7,7$ М. При кислотности более $7,7$ М K_d снижается вследствие уменьшения активности сорбируемого иона [14].

Большинство матричных элементов не может образовывать комплексы в этих условиях и не сорбируется на колонке, равно как и III, V и VI валентные состояния плутония и других трансурановых элементов, таких как америций. Торий подобно Pu(IV) образует сильные нитратные комплексы, в то время как уран образует только слабые комплексы и поэтому может быть легко отделен от плутония анионным обменом в азотнокислой среде [15].

Вследствие того, что плутоний в растворах имеет различные валентные состояния, ключевым моментом в анионообменном разделении является стабилизация плутония в четырёхвалентном состоянии. Для этого используют натрий нитрит, пероксид водорода и др. Для превращения всего плутония в Pu(IV) достаточно нескольких минут [16].

В проведенных исследованиях определяли оптимальные параметры стадии химической очистки. Объектами изучения служили образцы почвы, подготовленные методом полного кислотного разложения, который был описан выше (см. табл. 1). Учитывая данные литературных источников, в качестве ионообменных материалов были выбраны смолы марки АВ-17-8 и Dowex-1-2.

Ионообменное разделение изотопов плутония от матричных компонентов и радионуклидов состоит из следующих шагов: валентной стабилизации плутония в растворе образца, загрузки образца в анионообменную колонку, промывки колонки и элюирования плутония [17].

Для перевода и стабилизации изотопов плутония в одно валентное состояние на ста-

дии очистки и выделения целевой раствор ($7,5$ М HNO_3) был обработан 5 мл 30% H_2O_2 и нагрет до $60\text{--}80$ °С. Затем раствор был обработан нитритом натрия.

После перемешивания раствор пропускали через хроматографические колонки, заполненные смолами АВ-17-8 и Dowex-1-2, со скоростью $\sim 0,4$ мл/мин. Затем колонки промывали последовательно $7,5$ М HNO_3 , $9,0$ М HCl , $7,5$ М HNO_3 , скорость пропускания $\sim 0,6$ мл/мин. Далее элюировали изотопы Pu 100 мл раствора $0,5$ М HCl с добавлением $0,1$ М $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$, скорость пропускания $\sim 0,4$ мл/мин.

Для определения степени извлечения изотопов плутония элюаты прошли гамма-спектрометрические измерения (табл. 3).

Результаты спектрометрического анализа показали, что степень извлечения изотопов плутония при использовании анионитов АВ-17-8 и Dowex-1-2 практически сопоставима и составляет $90\text{--}96\%$. Учитывая стоимость смол, наиболее выгодным материалом для проведения радиохимической очистки и выделения является АВ-17-8.

Определение оптимальных параметров стадии получения счетного образца для альфа-спектрометрического измерения. Получение альфа-спектрометрического источника — последняя и не менее важная стадия радиохимического анализа изотопов плутония. Одним из главных критериев при обработке альфа-спектра является качество полученного образца, которое влияет на точность и достоверность измерения.

Таблица 3. Результаты определения эффективности степени извлечения изотопов плутония из почвы после полного кислотного разложения

Table 3. The results of determining the efficiency of the degree of extraction of plutonium isotopes from the soil after complete acid decomposition

Образец	Удельная активность ^{239}Pu , Бк/кг			Степень извлечения, %	
	До обработки	После обработки		AB-17-8	Dowex - 1-2
		AB-17-8	Dowex - 1-2		
П1	$3,2 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	90–96	
П2	$4,3 \cdot 10^5 \pm 0,9 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^5 \pm 0,7 \cdot 10^5$	$4,1 \cdot 10^5 \pm 0,7 \cdot 10^5$		
П3	$3,0 \cdot 10^4 \pm 0,7 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4 \pm 0,6 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4 \pm 0,6 \cdot 10^4$		

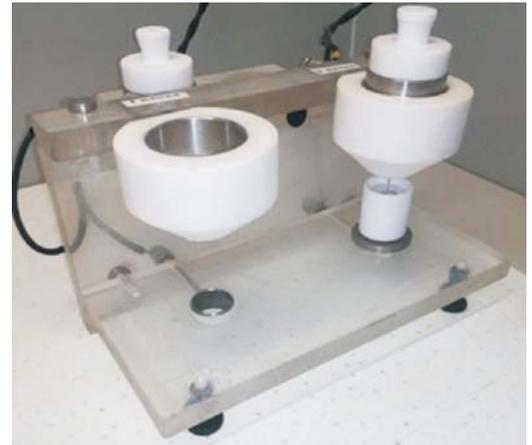


Рис. 3. Экспериментальная установка для электролитического осаждения изотопов Pu
Fig. 3. Experimental setup for electrolytic deposition of Pu isotopes

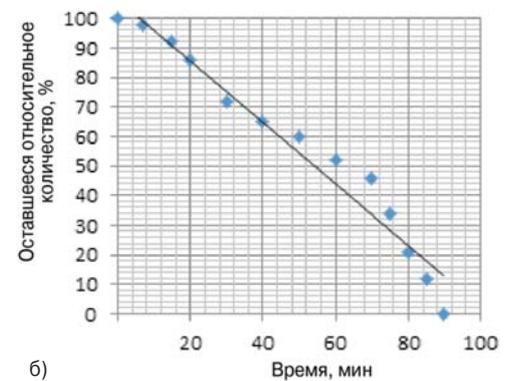
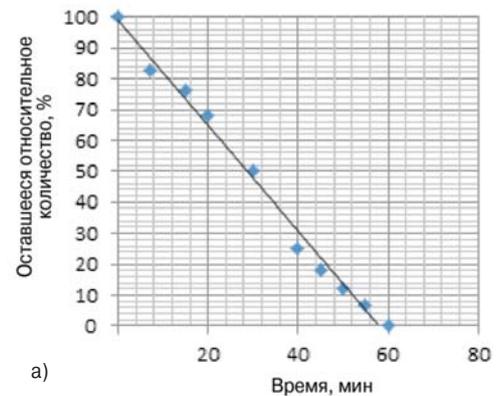


Рис. 4. Электролитическое осаждение Pu в 1 М $\text{NH}_4\text{Cl}/0,01$ М $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ (а) и в 1 М H_2SO_4 (б)
Fig. 4. Electrolytic deposition of Pu in 1 М $\text{NH}_4\text{Cl}/0,01$ М $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ (a) and in 1 М H_2SO_4 (b)



Рис. 5. Экспериментальная фильтровальная установка

Fig. 5. Experimental filter installation

Существует ряд методов, используемых для получения пленок счетных образцов [18]. Известен способ с испарением капли раствора с поверхности стальной подложки. Данный метод удобен простотой и экспрессностью, но имеет недостатки — неоднородность полученного слоя, образование кристаллов примесей и др.

В данной работе были рассмотрены наиболее часто используемые методы получения счетных образцов: электролитическое осаждение и соосаждение с редкоземельными элементами-носителями.

Способ электролитического осаждения заключается в следующем: изотопы плутония, находящиеся в растворенном состоянии в растворе электролита, под действием электрического тока осаждаются на диске из нержавеющей стали, который выступает в качестве катода. Анод — платиновая проволока. Исследования проводились в разборной электролитической ячейке из тефлона. Объем ячейки 15 мл, высота 40 мм, диаметр активного пятна 20 мм (рис. 3).

В качестве буферных растворов были рассмотрены два электролита, следующего состава: 1 М H_2SO_4 с $pH = 3,2$ и 1 М $NH_4Cl/0,01$ М $(NH_4)_2C_2O_4$ с $pH = 2,5$. Параметры проведения электролитического осаждения были выбраны с учетом ранее проведенных исследований, которые описаны в работе [19]. Так, сила тока поддерживалась 1,2–1,4 А, напряжение — 10 В.

Для определения количественного осаждения использовался образцовый радионуклидный раствор плутония — ^{242}Pu , производства российской государственной корпорации "Росатом" ФГУП "НПО Радиевый институт им. Хлопина". Экспериментальная оценка эффективности осаждения ^{242}Pu проводилась прямыми измерениями на альфа-спектрометре Alpha-Analyst 7401 фирмы Canberra (США). Результаты исследований представлены на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что в случае использования 1 М $NH_4Cl/0,01$ М $(NH_4)_2C_2O_4$ по истечении 60 мин продолжать электролиз не имеет смысла, поскольку к этому времени практически весь ^{242}Pu осаждается. А в случае использования 1 М H_2SO_4 время электролиза увеличивается до 80 мин.

Наилучшие источники для альфа-спектрометрии получают электролитическим осаждением — хорошо воспроизводимые, долговечные, особо тонкие образцы с равномерным распределением вещества по площади активного слоя, обеспечивающим высокое разрешение альфа спектра. Однако подготовка счетного образца электролитическим осаждением требует значительных затрат времени и подходящего оборудования.

При получении счетного образца методом соосаждения ^{242}Pu осаждали с небольшим количеством Nd (0,05 мг/мл) в виде фторидов с добавлением фтористоводородной кислоты. Далее осадок отделяли методом фильтрования через мембранный фильтр с порами размером 0,1 мкм. Исследования проводили с помощью фильтровальной установки, показанной на рис. 5.

Фильтр высушивался, укреплялся на подложке для измерений на альфа-спектрометре. Средний выход ^{242}Pu , полученный данным методом, составляет 60–80 %. Этот метод

быстр, недорог и обеспечивает разрешение, близкое к получаемому при электролитическом осаждении, практически при том же выходе.

Исследования показали применимость двух методов получения счетных образцов для альфа-спектрометрических измерений изотопов плутония. Выбор метода зависит от целей и задач научно-исследовательских лабораторий.

Заключение

На примере почв СИП, где объекты окружающей среды имеют историческое загрязнение вследствие ядерных испытаний, рассмотрена актуальная научная проблема по определению изотопов плутония. Рассмотрены основные стадии альфа-спектрометрического определения изотопов плутония с предварительной радиохимической подготовкой. Экспериментальным путем определено, что полное кислотное разложение с применением смеси $HF:HNO_3$ наиболее эффективно позволяет извлечь изотопы плутония из образцов почвы. Анализ результатов, полученных при сравнительной оценке методов разделения и очистки изотопов плутония, позволяет выбрать недорогой и достаточно эффективный материал — анионит АВ-17-8. Рассмотрены наиболее часто используемые методы получения счетных образцов для альфа-спектрометрии. Средний выход целевого радионуклида при соосаждении с редкоземельными элементами составляет 60–80 %, в случае электролитического осаждения 80–95 %.

Полученные экспериментальные данные существенно продвинули методическую базу в области аналитических методов выделения и разделения долгоживущих радионуклидов трансурановых элементов в объектах окружающей среды для территорий с напряженной радиационной обстановкой.

Исследование выполнено в рамках грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (номер проекта AP 05131530).

Литература

1. **Thakur P., Khaing H., Salminen-Paatero S.** Plutonium in the atmosphere: A global perspective. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 175–176. P. 39–512.
2. **Almayahi B.A., Tajuddin A.A., Jaafar M.S.** Radiobiological long-term accumulation of environmental alpha radioactivity in extracted human teeth and animal bones in Malaysia, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. P. 140–147.
3. **David L.C.** The Chemical Complexities of Plutonium. Los Alamos Science. 2000. № 26. C. 366–384.
4. **Vajda N.** Rapid method for the determination of actinides in soil and sediment samples by alpha spectrometry *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. № 8. P. 395–401.
5. **Xiaolin H., Per R.** Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 608. P. 105–139.
6. **Moreno J.** Combined procedure for determination of ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and Pu radionuclides in soil samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1997. Vol. 226. P. 279–284.
7. **Горлачев И.Д., Квочкина Т.Н., Лукашенко С.Н. и др.** Исследования и систематизация "горячих" частиц в почвах Семипалатинского испытательного полигона. Актуальные вопросы радиозологии Казахстана. Павлодар, Дом печати, 2011. Т. 1. Вып. 3. С. 11–59.
8. **Vajda N.** Development of extraction chromatographic separation procedures for the simultaneous determination of actinides. *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. № 1. P. 9–16.
9. **Chu N.Y.C.** Plutonium determination in soil by leaching and ion-exchange separation. *Analytical Chemistry*. 1971. Vol. 43. № 3. P. 449–452.
10. **Chamizo E., Jiménez-Ramos M.C., Wacker L., Vioque I., Garcia-Tenorio R.** Isolation of Pu-isotopes from environmental samples using ion chromatography for accelerator mass spectrometry and alpha spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 606. Iss. 2, 14. P. 239–245.
11. **Croudace I.** Rapid procedure for plutonium and uranium determination in soils using a borate fusion followed by ion-exchange and extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 1998. Vol. 371. P. 217–225.
12. **Yamamoto M.** Rapid dissolution of plutonium in soil by fusion with ammonium hydrogen sulfate followed by plutonium determination by ion exchange and alpha spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1985. Vol. 90. Iss. 2. P. 401–408.
13. **Павлоцкая Ф.И., Мясоедов Б.Ф.** Определение трансураниевых элементов в объектах природной среды. *Радиохимия*. 1996. Т. 38. № 3. С. 193–209.
14. **Мясоедов Б.Ф.** Аналитическая химия трансплутониевых элементов. М., Наука, 1972. С. 167–182.
15. **Silver G.L.** Plutonium: abridged method for oxidation-state determinations, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 303. Iss. 1. P. 1059–1063.
16. **Jixin Qiao, Xiaolin Hou, Manuel Miró, Per Roos.** 2009. Determination of plutonium isotopes in waters and environmental solids: A review. *Analytica Chimica Acta*. Vol. 652. Iss. 1–2. P. 66–83.
17. **Amoli H., S. Barker J.** Rapid analysis of americium and plutonium in environmental samples by alpha-spectrometry. *Indian Journal of Chemistry*. 2007. Vol. 46. P. 1618–1620.
18. **Vajda N., Molnar Z.S., Kabai E., Zagyvai P.** Radiochemical Determination Of Long-Lived Radionuclides In Environmental Samples. *Environmental Protection Against Radioactive Pollution*. Springer Netherlands. 2003. P. 133–146.
19. **Dalton G.C.** United Kingdom Atomic Energy. Authority Production Group, Rept 284(w). 1962. P. 56–62.

References

1. **Thakur P., Khaing H., Salminen-Paatero S.** Plutonium in the atmosphere: A global perspective. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017. Vol. 175–176. P. 39–512.
2. **Almayahi B.A., Tajuddin A.A., Jaafar M.S.** Radiobiological long-term accumulation of environmental alpha radioactivity in extracted human teeth and animal bones in Malaysia, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2014. Vol. 129. P. 140–147.
3. **David L.C.** The Chemical Complexities of Plutonium. Los Alamos Science. 2000. № 26. C. 366–384.
4. **Vajda N.** Rapid method for the determination of actinides in soil and sediment samples by alpha spectrometry *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. № 8. P. 395–401.
5. **Xiaolin H., Per R.** Critical comparison of radiometric and mass spectrometric methods for the determination of radionuclides in environmental, biological and nuclear waste samples *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 608. P. 105–139.
6. **Moreno J.** Combined procedure for determination of ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am and Pu radionuclides in soil samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1997. Vol. 226. P. 279–284.
7. **Gorlachev I.D., Kvochkina T.N., Lukashenko S.N. i dr.** Issledovaniya i sistematzatsiya "goryachikh" chastits v pochvakh Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona. Aktual'nye voprosy radioekologii Kazakhstana. Pavlodar, Dom pechati, 2011. T. 1. Vyp. 3. S. 11–59.
8. **Vajda N.** Development of extraction chromatographic separation procedures for the simultaneous determination of actinides. *Radiochimica Acta*. 2009. Vol. 97. № 1. P. 9–16.
9. **Chu N.Y.C.** Plutonium determination in soil by leaching and ion-exchange separation. *Analytical Chemistry*. 1971. Vol. 43. № 3. P. 449–452.
10. **Chamizo E., Jiménez-Ramos M.C., Wacker L., Vioque I., Garcia-Tenorio R.** Isolation of Pu-isotopes from environmental samples using ion chromatography for accelerator mass spectrometry and alpha spectrometry. *Analytica Chimica Acta*. 2008. Vol. 606. Iss. 2, 14. P. 239–245.
11. **Croudace I.** Rapid procedure for plutonium and uranium determination in soils using a borate fusion followed by ion-exchange and extraction chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 1998. Vol. 371. P. 217–225.
12. **Yamamoto M.** Rapid dissolution of plutonium in soil by fusion with ammonium hydrogen sulfate followed by plutonium determination by ion exchange and alpha spectrometry, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 1985. Vol. 90. Iss. 2. P. 401–408.
13. **Pavlotskaya F.I., Myasoedov B.F.** Opredelenie transuranovykh elementov v ob'ektakh prirodnoi sredy. *Radiokhimiya*. 1996. Т. 38. № 3. С. 193–209.
14. **Myasoedov B.F.** Analiticheskaya khimiya transplutoniyevykh elementov. М., Nauka, 1972. S. 167–182.
15. **Silver G.L.** Plutonium: abridged method for oxidation-state determinations, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 303. Iss. 1. P. 1059–1063.
16. **Jixin Qiao, Xiaolin Hou, Manuel Miró, Per Roos.** 2009. Determination of plutonium isotopes in waters and environmental solids: A review. *Analytica Chimica Acta*. Vol. 652. Iss. 1–2. P. 66–83.
17. **Amoli H., S. Barker J.** Rapid analysis of americium and plutonium in environmental samples by alpha-spectrometry. *Indian Journal of Chemistry*. 2007. Vol. 46. P. 1618–1620.
18. **Vajda N., Molnar Z.S., Kabai E., Zagyvai P.** Radiochemical Determination Of Long-Lived Radionuclides In Environmental Samples. *Environmental Protection Against Radioactive Pollution*. Springer Netherlands. 2003. P. 133–146.
19. **Dalton G.C.** United Kingdom Atomic Energy. Authority Production Group, Rept 284(w). 1962. P. 56–62.

И.О. Зверева – ведущий инженер, Институт радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра РК, 071100 Казахстан, г. Курчатова, ул. Бейбит атам 2, e-mail: zvereva@nnc.kz • В.В. Каширский – начальник отдела аналитических исследований, e-mail: kashirskiy@nnc.kz • А.Н. Шатров – начальник лаборатории ядерно-физических методов анализа, e-mail: shatrov@nnc.kz

I.O. Zvereva – Leading Engineer, Institute of Radiation Safety and Ecology of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 071100 Kazakhstan, Kurchatov, Krasnoarmeyskaya Str. 2, e-mail: zvereva@nnc.kz • V.V. Kashirsky – Head of Analytical Research, e-mail: kashirskiy@nnc.kz • A.N. Shatrov – Head of the Laboratory of Nuclear Physics Analysis Methods, e-mail: shatrov@nnc.kz