

УДК 543.51: 546.799.4 + 621.384.668.83

© И. В. Чубинский-Надеждин, Ю. В. Куликов, А. Г. Каменев,
Т. П. Макарова, А. В. Степанов

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ПРЕДЕЛЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ УЛЬТРАМАЛЫХ ПРОБ УРАНА И ПЛУТОНИЯ

Представлена схема проведения анализа изотопного состава U и Pu на термоионизационном масс-спектрометре с многоканальным счетчиком ионов. Рассмотрены принципиальные с точки зрения возможностей измерения ультрамалых проб аналитические характеристики: чувствительность и пределы обнаружения. Количественные оценки сделаны на основании обобщения экспериментальных результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность определения содержания изотопов актинидов в образцах окружающей среды и образцах техногенного происхождения нередко состоит в том, что не только концентрация анализируемых элементов находится на следовом уровне, но и общее количество образца может быть мало. В течение нескольких лет в Институте аналитического приборостроения РАН совместно с Радиевым институтом им. В.Г. Хлопина успешно разрабатывается масс-спектрометрический метод определения содержания изотопов урана и плутония в ультрамалых пробах.

Когда заранее неизвестен состав и соотношение компонентов малой пробы, регистрация быстро меняющегося масс-спектра должна производиться одновременно во всем интересующем диапазоне масс ионов. Поэтому опыт разработки и применения многоканальных детекторов-счетчиков ионов с одновременной регистрацией многих масс-спектральных пиков [1, 2] получил удачное воплощение при создании аппаратно-методических основ метода изотопного анализа ультрамалых проб и исследовании его характеристик [3, 4].

При таком подходе оказывается достаточно эффективным применение термоионизационной масс-спектрометрии (ТИМС), допускающей работу с объемами растворов проб порядка единиц микролитров. Относительно простой отечественный масс-спектрометр МИ1320 с магнитным анализатором был оснащен специально разработанным многоканальным детектором, работающим в режиме счета ионов [5, 6].

В состав детектора т.н. электронно-оптического типа входят сборка микроканальных пластин (МКП), люминесцентный экран, оптическая система и фоточувствительный прибор с зарядовой

связью. Детектор имеет широкий динамический диапазон, а также дает возможность проводить регистрацию спектров с высокой разрешающей способностью по массе благодаря высокому пространственному разрешению самого детектора ионов. Это важно для правильного учета спектрального фона при анализе малых проб.

Таким образом, были обеспечены высокая чувствительность, снижение пределов обнаружения анализируемых компонентов и уменьшение неопределенности результатов измерений изотопных отношений (ИО) в ультра-малых пробах [6]. Это позволяет, в частности, проводить анализы проб МАГАТЭ в рамках Программы контроля выполнения Договора о нераспространении ядерного оружия.

В данной статье представлена схема проведения анализа изотопного состава урана и плутония и рассмотрены ее основные параметры. Показан уровень принципиальных с точки зрения возможностей измерения ультра-малых проб аналитических характеристик — чувствительности и пределов обнаружения. Оценки сделаны на основании обобщения экспериментальных результатов.

СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА И ЕЕ ПАРАМЕТРЫ

На рис. 1 показана схема проведения анализа, представляющая собой семь последовательных стадий. Начальная стадия I — это исходный *образец* (например, воздушный фильтр) с массой M рассматриваемого изотопа, конечная стадия VII — полное *число импульсов* N , зарегистрированное в спектральном пике данного изотопа. Стадии I...V — подготовка образца перед внесением в источник ионов масс-спектрометра, стадии V...VII — собственно масс-спектрометрические измерения.

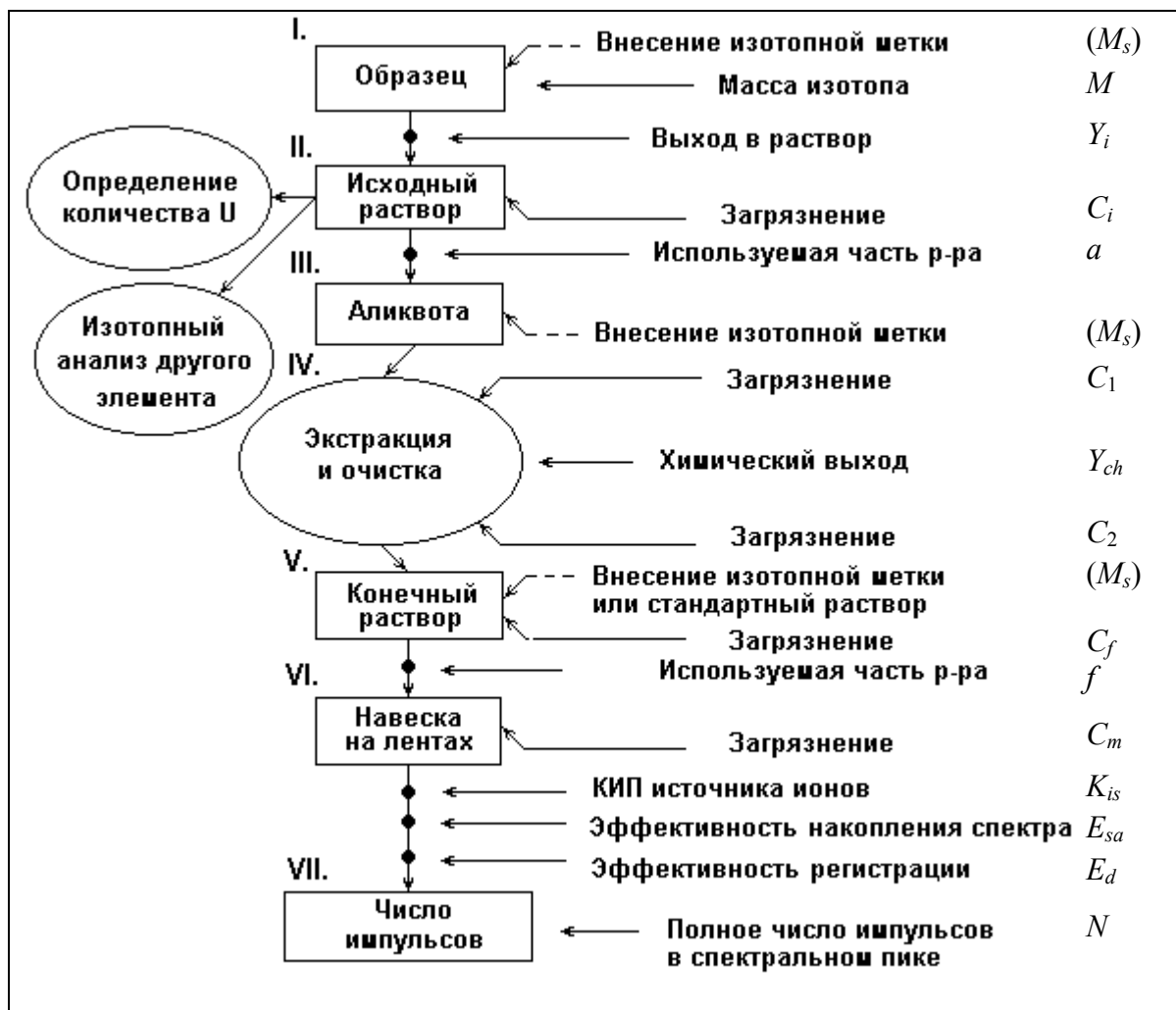


Рис. 1. Схема проведения анализа и ее основные параметры

Ход анализа при поэтапном представлении можно охарактеризовать численными параметрами, которые отражают преобразования и манипуляции с образцом, эффективность процессов, возможные паразитные влияния.

В зависимости от цели проводимых измерений (изотопный анализ образца, калибровка прибора, определение бланков химической подготовки и приборных бланков) на различных стадиях могут вноситься изотопные метки. Это фиксированные количества M_s тех изотопов анализируемых элементов, которые заведомо отсутствуют или присутствуют в относительно малых количествах в реальных образцах и при этом не представляют специального интереса. Появляется возможность

использовать метод масс-спектрометрии с изотопным разбавлением (МСИР), основа которого — идентичность химических превращений изотопов одного элемента при пробоподготовке. Измерения содержаний по отношению к метке (т.е. соответствующие ИО в масс-спектре) используются для количественных определений содержания интересующих изотопов.

Исследуемый образец растворяется после ооления, и на стадии II получается т. н. *исходный раствор* в объеме 0.5–0.8 мл. Выход изотопов из образца в раствор обычно принимается близким к 100 % ($Y_i \approx 1$). В исходном растворе может присутствовать загрязнение данным изотопом на уровне C_i (в единицах массы, как и M), которое

вносится на I и II стадиях, в том числе с используемыми реактивами.

Исходный раствор делится на аликвоты (стадия III): 1) для проведения изотопного анализа урана и плутония (для Pu эта часть составляет $\alpha = 0.25-0.5$); 2) для определения содержания урана люминесцентным методом; 3) для количественного определения плутония методом МСИР с добавлением метки изотопа ^{242}Pu или ^{244}Pu массой M_s .

Стадия IV — *выделение элементов и очистка* на зернах ионно-обменной смолы. Этот процесс сам состоит из нескольких этапов и циклически повторяется. Он может быть охарактеризован коэффициентом химического выхода элемента Y_{ch} . Загрязнения, вносимые на четвертой стадии, условно разделим на две группы: относящиеся к начальным этапам выделения описываются величиной C_1 , а на конечных этапах они составляют C_2 .

Химическая подготовка заканчивается приготовлением т. н. *конечного раствора* элемента в 1 М азотной кислоте (стадия V), объем раствора в пластиковой микропробирке составляет 25–30 мкл. Масса возможного загрязнения C_f на данной стадии относится как к раствору кислоты, так и к ненормированному присутствию в стандартах (при проведении калибровки прибора с их использованием). Со стадии V начинается приборная часть масс-спектрометрического анализа, и C_f в значительной степени может влиять на уровень предельных возможностей методики.

Собственно масс-спектрометрические измерения занимают стадии V...VII. Пластиковым капилляром на ленты-испарители источника ионов наносится 10–15 мкл конечного раствора, т. е. используемая часть раствора составляет $f = 0.5$. Стадия VI — *навеска пробы на лентах*, которая в пересчете на анализируемые изотопы U и Pu может составлять от 0.01 фг до 100 пг. В наших работах используется трехленточный источник ионов с вольфрамовыми испарителями и ренийевым ионизатором. Блоки с тремя лентами являются сменными элементами источника ионов.

К стадии VI условно сведены все загрязнения C_m рассматриваемым изотопом, которые могут быть связаны с прибором: эффекты "памяти" лент, компонентов устройства нанесения раствора пробы, а также элементов источника ионов, особенно проявляющиеся в процессе продолжительных измерений из-за постепенного прогрева. Кроме того, в C_m условно пересчитываются вклады зарегистрированного фона рассеянных ионов, спектрального фона и темного фона детектора ионов, если эти паразитные сигналы реализуются в конкретных масс-спектрах в виде пиков, которые невозможно отличить от спектральных пиков актинидов по их положению на шкале масс.

Перед началом использования каждого блока

с новыми лентами проводится экспериментальное определение его работоспособности — коэффициента использования пробы (КИП) — при нанесении фиксированного количества стандартного раствора изотопов Pu (навеска около 0.1 пг). Контролируется полное число ионов Pu на входе детектора (по количеству импульсов) при рабочей температуре ионизатора около 1900 °С (которая обеспечивает долговечность лент) и при оптимальной настройке ионно-оптической системы. Обобщение информации, накопленной в нескольких десятках испытаний, показало, что испарительные блоки позволяют получить КИП по плутонию в диапазоне от $K_{is} \approx 4 \times 10^5$ ионов/пг до $K_{is} \approx 1.2 \times 10^6$ ионов/пг при разрешении масс-анализатора около 1000. После проведения измерений остатки предыдущей пробы отжигаются с постоянным контролем масс-спектра в области актинидов при максимально допустимых температурах лент испарителей (1850 °С). Таким образом, перед нанесением очередной пробы заведомо гарантируются приемлемое значение КИП и отсутствие остаточного фона блока при рабочих температурах накала лент испарителей от 800 °С до 1700 °С.

Чувствительность анализа в значительной мере определяется аналитическими возможностями детектора ионов масс-спектрометра. Очевидно, что она максимальна, если спектральные пики всех изотопов элемента и фон регистрируются одновременно, т. е. использование ионных пучков близко к 100 %. В данной работе при регистрации ионов с помощью многоканального детектора, в рабочую область которого одновременно могут попадать все спектральные пики с массой от 231 а.е.м. до 245 а.е.м., для U и Pu обеспечивается эффективность накопления спектров $E_{sa} \approx 1$. Это дает принципиальный выигрыш в чувствительности по сравнению с регистрацией одноканальным детектором ионов, работающим в режиме накопления сигналов с последовательным сканированием масс-спектра или с переключением пиков (при этом $E_{sa} \ll 1$).

Эффективность регистрации E_d , т. е. среднее число зарегистрированных импульсов в пересчете на один ион, у детекторов ионов на базе МКП, работающих в режиме счета, обычно не превышает 0.5–0.8. В нашем случае $E_d \approx 0.5$ имп/ион, что вполне приемлемо для многоканального детектора ионов с высоким пространственным разрешением.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Используя обозначения, принятые в схеме проведения анализа на рис. 1, можно записать полное число импульсов в спектральном пике как произведение параметров:

$$N = (E_d \times E_{sa}) \times K_{is} \times Y_{ch} \times (f \times a) \times Y_i \times M. \quad (1)$$

Следует отметить, что зависимость N от M в принципе может быть нелинейной, т. е. некоторые параметры в (1) зависят от общего количества анализируемого элемента, содержащегося в пробе на следовом уровне. В наибольшей степени это относится, по-видимому, к параметрам K_{is} и Y_{ch} , которые отражают результаты многоступенчатых и селективных процессов. Причиной проявления данного эффекта при анализах реальных образцов с разнообразным и неопределенным составом основных (матричных) компонентов может стать, например, кратковременное изменение работы выхода ленты-ионизатора в источнике ионов в присутствии паров компонентов пробы или вариации в ходе процессов сорбции—десорбции на зернах ионообменной смолы. Поскольку предсказать количественно степень влияния рассматриваемых эффектов непросто, соответствующие оценки целесообразно получить опытным путем. Параметры E_d и E_{sa} при нормальной работе системы регистрации строго фиксированы, можно принять $E_d \times E_{sa} \approx 0.5$. Значения f и a выбираются экспериментатором, и в данном рассмотрении будем считать $Y_i = 1$. Тогда можно выразить чувствительность анализа S при $a = 1$ и $f = 1$, нормируя результаты любых измерений с учетом значений a и f , выбранных в каждом конкретном случае:

$$S = N / M = (E_d \times E_{sa}) \times (K_{is} \times Y_{ch}). \quad (2)$$

Для спектральных пиков меток берем $M = M_s$, для расчетов в экспериментах, начинающихся со стадии V, принимаем также $Y_{ch} = 1$.

По рассмотренной на рис. 1 схеме проводятся три типа измерений. Определение т. н. "масс-спектрометрических бланков" (оценка величин C_f и C_m), а также контроль параметров масс-спектрометра и калибровка неоднородности эффективности регистрации детектора ионов по каналам начинаются от стадии V и завершаются заключительной стадией VII. Для этих целей применяются растворы меток, стандартов и тестовые растворы. Второй тип измерений начинается от стадии II или III и проводится с целью определения бланков пробоподготовки — оценки параметров загрязнения C_i , C_1 , C_2 и далее, а также для контроля коэффициента химического выхода элементов Y_{ch} . При этом могут вноситься изотопные метки. Наконец, от стадии I начинается основной, третий, тип измерений — это собственно анализ реальных образцов, а также определение бланков методом МСИР.

Ниже приведены обобщенные результаты нескольких десятков экспериментов, в которых оценивалась чувствительность. Содержания элемен-

тов определены методом МСИР.

1) В измерениях первого типа было получено $S = 3.4 \times 10^5$ имп/пг ± 50 % (относительное СКО) при содержании плутония в количестве 0.01–10 пг, а для урана $S = 1.3 \times 10^5$ имп/пг ± 40 % при его содержании в количестве 0.1–100 пг.

2) В измерениях второго и третьего типа в аликвотах, содержащих метки плутония в количестве 2.2–2.6 пг, чувствительность составляла $S = 1.8 \times 10^5$ имп/пг ± 50 %.

3) В измерениях второго и третьего типа в немеченых аликвотах с содержанием плутония не более 0.1 пг (бланки) получено значение $S = 1.1 \times 10^5$ имп/пг ± 60 %.

4) В измерениях реальных образцов (третий тип измерений) с содержанием плутония 0.1–10 пг среднее значение $S = 1.2 \times 10^5$ имп/пг ± 125 %.

Соотношение чувствительностей по урану и по плутонию показывает, по-видимому, влияние разницы потенциалов ионизации этих элементов (расчетное соотношение КИП источника ионов для U и Pu близко к 0.5). Сравнение первой и второй групп результатов позволяет на основании приведенной схемы анализа сделать вывод о средней величине химического выхода при выделении и очистке плутония $Y_{ch} \approx 0.5$. Возможно, что соотношение данных второй и третьей групп (1.1 / 1.8) отражает влияние массы анализируемого компонента: уменьшению массы соответствует снижение S примерно в полтора раза. Значительная дисперсия распределения результатов четвертой группы по сравнению с данными первой–третьей групп может указывать на проявление эффектов, связанных с вариациями состава реальных образцов. В этом случае становится велика вероятность значений чувствительности, которые в несколько раз меньше среднего значения. Отметим, что относительное СКО результатов измерений S в первых трех группах приблизительно соответствует экспериментально оцененному разбросу КИП разных блоков лент, используемых в источнике ионов масс-спектрометра.

ПРЕДЕЛЫ ОБНАРУЖЕНИЯ

Очевидно, что с помощью (1) и (2) можно выразить количество (массу) изотопа через зарегистрированное число импульсов в его спектральном пике. В частности, в отсутствие реального образца, т. е. при измерении бланков,

$$M_b = N_b / (S \times f \times a), \quad (3)$$

где M_b — эквивалентная масса в бланке; N_b — число импульсов при измерении бланка.

В N_b присутствует вклад многих источников загрязнений согласно схеме рис. 1:

$$N_b = S \times f \times (a \times C_i + C_1 + (C_2 + C_f + C_m / f) / Y_{ch}). \quad (4)$$

Легко получить:

$$M_b = C_i + C_1 / a + C_2 / (a \times Y_{ch}) + (C_f + C_m / f) / (a \times Y_{ch}). \quad (5)$$

Все коэффициенты в данной формуле — f , a , Y_{ch} — меньше единицы. Поэтому относительный вклад загрязнений возрастает по ходу от стадии I к стадии V (при соизмеримых значениях загрязнений от C_i к C_m). Минимально-возможное значение бланка, а значит, и предела обнаружения фактически определяется приборными стадиями анализа, т. е. масс-спектрометрическим бланком. Он представлен четвертым членом в правой части выражения (5), содержащим C_f и C_m .

Примеры результатов, получаемых на стадии VII, представлены на рис. 2. Показаны два спектра, которые получены по рассматриваемой схеме анализа в разных условиях, отмечены идентифицированные пики изотопов U и Pu. Вертикальные пунктирные линии соответствуют "правильным" положениям центров пиков актинидов при данной

настройке магнитного поля анализатора. Пики фона обычно заметно смещены (на 2–3 канала детектора).

Спектр, изображенный с темным заполнением, является спектром масс-спектрометрического бланка (измерения первого типа от стадии V). Регистрация осуществлялась по методу полного выгорания при изменении температуры испарителей от 800 °C до 1800 °C вплоть до снижения скорости счета импульсов в спектральном пике ^{238}U до величины, соответствующей остаточному фону отожженного блока лент. Таким образом, данный спектр количественно полностью отображает состав масс-спектрометрического бланка в области масс актинидов. Рядом с каждым пиком этого спектра показано полное число импульсов, накопленное в данном пике за время измерений. Другой спектр на рис. 2 показан частично — только в области изотопов плутония. Это сумма двух масс-спектров аликвоты исходного раствора с внесенной меткой ^{242}Pu в количестве $M_s \approx 2.2$ пг. Плутоний был обнаружен только в двух последовательно зарегистрированных спектрах и суммарное число импульсов в пиках ^{242}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu

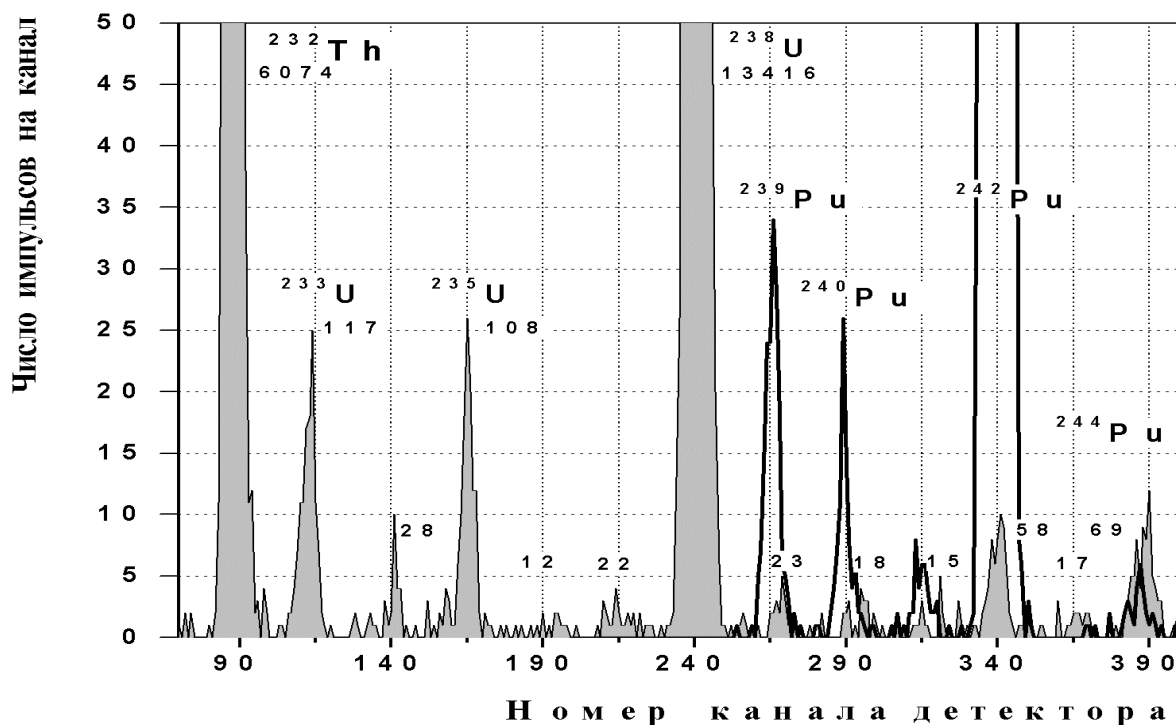


Рис. 2. Спектр масс-спектрометрического бланка (с темной заливкой), совмещенный со спектром аликвоты бланка пробоподготовки с внесенной меткой ^{242}Pu (спектр без заливки в области масс плутония)

составило приблизительно 2.1×10^4 , 170 и 60 соответственно. Целью данного эксперимента являлось определение т. н. "бланка пробоподготовки" по плутонию, он относится ко второму типу измерений с началом на стадии III. Для меченого раствора в данном эксперименте $f \approx 1/12$, $a \approx 1/3$.

Эти данные позволяют сделать оценки бланка пробоподготовки и масс-спектрометрического бланка. Поскольку изотопное отношение в спектре бланка пробоподготовки $^{242}\text{Pu} / (^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}) \approx 90$, то общее количество плутония (помимо метки) в аликвоте приблизительно 24 фг, а в пересчете на весь исходный раствор (и образец на стадии I) общее количество плутония $24 / a \approx 70\text{--}75$ фг. Чувствительность составила около $S = (21000 / f) / 2.2 \approx 1.1 \times 10^5$ имп/пг.

Принимая величину фона в спектре масс-спектрометрического бланка в пределах 10–15 импульсов на пик спектра, получаем, что соотношение количества плутония $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ в масс-спектрометрическом бланке и бланке пробоподготовки находится в пределах $(10 \dots 20) / 230$. Поскольку в обоих этих измерениях использованы одинаковые объемы конечных растворов и величины S_f одинаковы, можно сделать вывод, что вклад приборных стадий V...VII в величину бланка плутония по $^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$ не превышает 5–10 %.

Оценим масштаб минимальных значений предела обнаружения плутония на основании полученных экспериментальных данных. Для выявления пиков в масс-спектрах такого вида, как показано на рис. 2, необходимо набрать 10–20 импульсов на пик (за вычетом фона) при отношении пик / фон не менее 2 [7]. В этих условиях возможна и идентификация положения спектрального пика. Взяв значение чувствительности по плутонию 1.1×10^5 имп/пг, получаем, что при наиболее благоприятных условиях проведения анализа ($f \approx 1$, $a \approx 1$) в образце можно обнаружить приблизительно 0.2 фг ^{239}Pu . При анализе по более реальной схеме предел обнаружения плутония, о котором могла бы идти речь при отсутствии загрязнения перед приборными стадиями анализа, составляет 1 фг, а по концентрации в исходном растворе — порядка 1 фг/мл.

Наличие в масс-спектрометрическом бланке заметно выраженных спектральных пиков ^{242}Pu и/или ^{244}Pu (изотопов, многократно используемых как метки) может объясняться "памятью" источника ионов, т. к. регистрация происходит вплоть до относительно высоких температур накала испарителей для полного накопления спектра урановой фракции. При этом из-за прогрева других элементов источника ионов сильнее проявляются компоненты спектра, не связанные с испарителями. Формальный учет всех накопленных в этих условиях импульсов приводит к оценке предельных

бланков по изотопам ^{242}Pu и ^{244}Pu порядка 1 фг, однако это — пессимистическая оценка, поскольку при обычных рабочих температурах регистрации плутония в пробе, нанесенной на испарители, такие эффекты "памяти" отсутствуют.

Аналогичным образом можно провести оценки для урана, приняв, например, среднее значение чувствительности по урану $S \approx 4 \times 10^4$ имп/пг. В масс-спектрометрических бланках обычно накапливается в среднем 20 тысяч импульсов основного изотопа урана ^{238}U (см., например, рис. 2). Тогда бланк в пересчете на исходный образец составляет порядка единиц пикограмм по ^{238}U и единицы–десятки фемтограмм по младшим изотопам. Сравнение с бланками пробоподготовки (от стадии III) так же, как и для плутония, показывает вклад масс-спектрометрического бланка не более 5 %. В отличие от плутония, который практически не обнаруживается в используемых нами реактивах, масс-спектрометрический бланк урана может содержать заметный вклад S_f , обусловленный наличием следов урана в конечном растворе азотной кислоты (стадия V).

В любом случае при проведении анализов реальных образцов о возможности обнаружения элементов можно говорить только на основании статистических оценок ансамблей реализаций бланков пробоподготовки [7], измеренных в соответствии с рассмотренной схемой анализа. Представление о масштабе величин дает рис. 3, на котором собраны результаты определений бланков пробоподготовки, проводившихся в течение 2001–2002 гг. По оси ординат отложена масса компонента, причем для плутония она выражена в пикограммах, а для урана — в нанограммах. Имеющиеся экспериментальные данные по бланкам для плутония в среднем соответствуют 50–60 фг в пересчете на образец, а для урана (^{238}U) — около 0.2 нг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уровень аналитических возможностей рассматриваемого метода, реализованный в настоящее время в ИАиП РАН и Радиовом институте им. В.Г. Хлопина, в целом соответствует известным современным достижениям. Имеются пути некоторого улучшения характеристик. Можно ожидать, в частности, повышения чувствительности в 2–3 раза за счет модификаций конструкции и режимов работы масс-спектрометра и детектора ионов. Приведенные здесь данные показывают, что имеется определенный резерв снижения пределов обнаружения в несколько раз вплоть до уровней, близких к значениям приборных бланков. Этого можно достигнуть путем использования, например, более чистых реактивов.

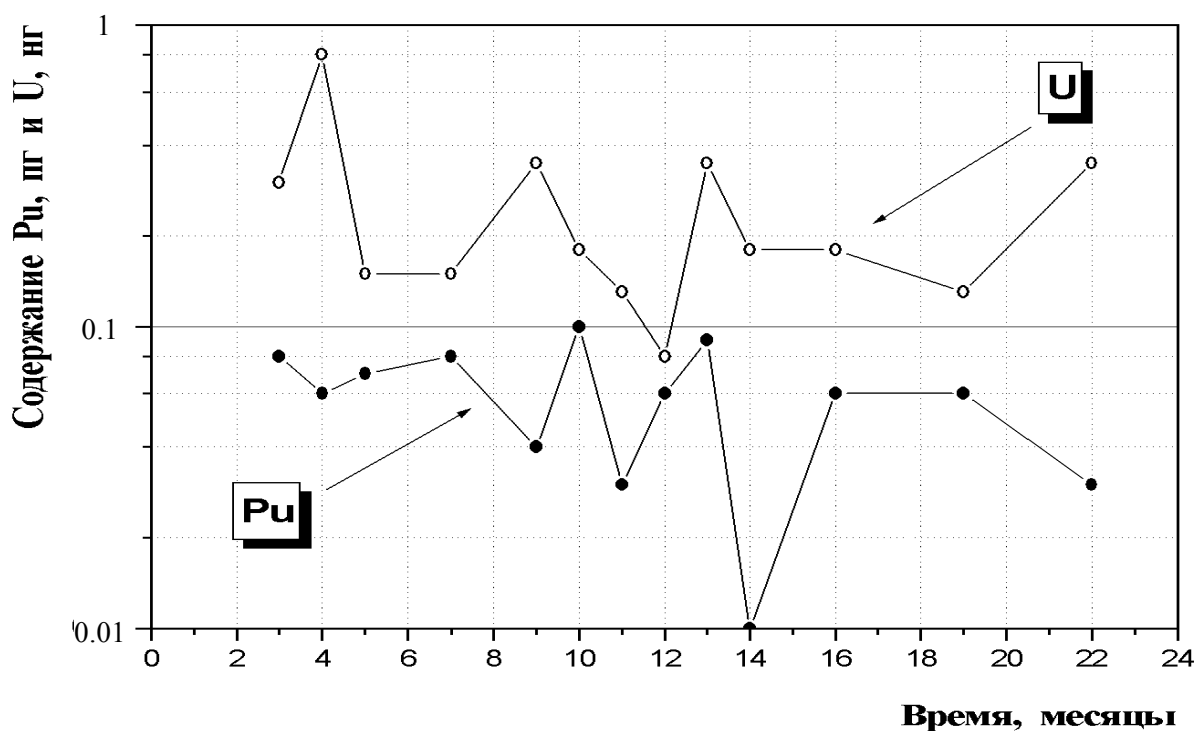


Рис. 3. Результаты определения бланков пробоподготовки для U и Pu.

Бланки U (светлые кружки) даны в нанogramмах, бланки Pu (темные кружки) даны в пикogramмах. Измерения произведены с использованием метода изотопного разбавления

Авторы выражают благодарность В.М. Александру, В.Д. Домкину, Е.В. Певцовой, М.В. Пенькину и М.В. Рыжинскому за полезные обсуждения и помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубинский-Надеждин И.В., Каменев А.Г. Сигнал и шум на выходе детектора частиц, содержащего ЭОП и многоэлементный фотоприемник // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36, № 11. С. 2216–2225.
2. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В. Применение детекторов ионов с большим динамическим диапазоном в масс-спектрометрах // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 1. С. 57–64.
3. Kamenev A.G., Chubinski-Nadezhdin I.V., Kulikov J.V. Detection Thresholds in Actinides Analysis of Soil and Metal Samples by TIMS // Abstr. Papers 14th Int. Mass Spectrometry Conference, Aug. 25–29, 1997, Helsinki, Finland. P. 150.
4. Каменев А.Г., Куликов Ю.В., Снятков В.С., Чубинский-Надеждин И.В. Анализ следовых количеств элементов на термоионизационном масс-спектрометре, оснащённом многоканальным детектором ионов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9, № 1. С. 39–42.
5. Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В., Степанов А.В., Макарова Т.П. Масс-спектрометрический анализ изотопного состава актинидов в ультрамалых пробах // Тез. докл. Всерос. конф.

- "Химический анализ веществ и материалов", 16–20 апр., 2000 г., Москва. П-4, С. 366–367.
6. Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В., Каменев А.Г. Масс-спектрометрический изотопный анализ следовых количеств актинидов с применением многоканального счетчика ионов // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 3. С. 43–51.
7. Дерфель К. Статистика в аналитической химии (пер. с нем.). М.: Мир, 1994. 268 с.
- Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (И.В. Чубинский-Надеждин, Ю.В. Куликов, А.Г. Каменев)*
- НПО Радиевый институт им. Хлопина, Санкт-Петербург (Т.П. Макарова, А.В. Степанов)*

Материал поступил в редакцию 30.01.2003.

SENSITIVITY AND DETECTION LIMITS IN MASS SPECTROMETRIC ANALYSIS OF ULTRA-SMALL SAMPLES OF URANIUM AND PLUTONIUM

I. V. Chubinski-Nadezhdin, Yu. V. Kulikov, A. G. Kamenev,
T. P. Makarova*, A. V. Stepanov*

Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg
** V.G. Khlopin Radium Institute, Saint-Petersburg*

The run of isotopic analysis by TIMS and basic characteristics of its algorithm are presented. The sensitivity and detection limits of U and Pu are discussed. Numerical estimations are given considering experimental data.