

Оценка применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для задач специального индивидуального дозиметрического контроля

В.Р. Баталов, А.Б. Соколова, А.В. Ефимов, А.Б. Джунушалиев

Южно-Уральский институт биофизики Федерального медико-биологического агентства России, Озерск, Россия

В условиях современного радиационно опасного производства повышенные уровни внутреннего облучения персонала обусловлены в основном поступлением радионуклидов в ситуациях, вызванных неисправностью оборудования или неправильными действиями персонала, что может приводить или приводит к облучению выше установленных норм. В таких случаях для определения величины поступления и оценки ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения собирается суточное количество мочи и/или кала, далее следует подготовка счетных образцов и их последующее измерение. В совокупности продолжительность получения результата составляет от 3 до 8 дней в зависимости от метода измерения. В случае острого поступления плутония важно как можно быстрее оценить уровни поступления нуклида в организм, чтобы принять решение о тактике лечения и снижения дозовых нагрузок. Для достижения вышеуказанной цели в Южно-Уральском институте биофизики была разработана методика измерения активности плутония-239 в крови с применением масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой, так как в первые часы и сутки после поступления (ингаляционного или через поврежденные кожные покровы) концентрация радионуклида в крови находится на максимальном уровне. Также разработан метод измерения плутония в аликвоте мочи с использованием масс-спектрометра для выполнения специального индивидуального дозиметрического контроля, практически не требующий пробоподготовки, что позволяет получить оценку поступления в течение нескольких часов. Показано, что в зависимости от пути поступления и химической формы поступающих соединений плутония измерение активности плутония в крови и аликвоте мочи методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой позволяет определять от 0,1 до 47% от предела поступления в течение первых суток после события. Анализ пробы крови занимает от 1 до 1,5 рабочих дней против недели для анализа пробы мочи альфа-спектрометрическим методом. Применение разработанной методики, помимо целей индивидуального дозиметрического контроля, позволит получить новую информацию о влиянии хелатотерапии на поведение плутония в организме человека.

Ключевые слова: масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, плутоний, кровь, моча, дозиметрия внутреннего облучения.

Введение

Обеспечение достоверной информацией об индивидуальных дозах внутреннего облучения персонала, обусловленного инкорпорированным плутонием, является одной из основных задач внутренней дозиметрии. В связи с совершенствованием средств индивидуальной защиты и улучшением производственных условий повышенные уровни внутреннего облучения персонала обусловлены в основном однократными поступлениями (далее острым поступлением) в ситуациях, вызванных неисправностью оборудования, неправильными действиями персонала и т.п., что может приводить или приводит к облучению выше установленных норм (далее нештатные ситуации) [1]. Классические методы дозиметрии внутреннего облу-

чения, обусловленного поступлением плутония, в России и в мире основаны на интерпретации результатов измерений активности радионуклида в теле человека, органе или ткани и/или в биологических образцах [2].

В настоящее время основными методами измерения активности плутония в биологических пробах являются альфа-радиометрический и альфа-спектрометрический методы. Недостатками радиометрического метода являются худший предел обнаружения относительно других методов и возможность определения только суммарной альфа-активности изотопов плутония $^{238,239+240}\text{Pu}$. К недостаткам метода альфа-спектрометрии следует отнести необходимость долгой радиохимической подготовки и длительное время измерения образцов. В последние годы в качестве

Баталов Вадим Робертович

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д.19; E-mail: vrbatalov@mail.ru

метода измерения активности радионуклидов в биосубстратах все большее распространение находит метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС), который обладает значительно лучшими пределами обнаружения для многих элементов. К примеру, измерение различных элементов (особенно токсичных металлов) методом ИСП-МС в крови широко распространено благодаря высокой чувствительности метода и возможности одновременного измерения десятков элементов [3–7]. В ЮУриБФ при выполнении специального (аварийного) индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) на определенных этапах используются все 3 метода. Сравнительная характеристика методов приведена в таблице 1.

В случае острого поступления плутония (как ингаляционного, так и через поврежденные покровы кожи) важно как можно быстрее оценить уровни поступления нуклида в организм. Для этого целесообразно анализировать

аликвоту крови, так как в первые сутки после острого поступления в крови содержится более 90% системной активности. Возможность быстрого отбора аликвоты крови (в отличие от сбора суточного количества мочи) позволяет в кратчайшие сроки оценить уровни поступления плутония в организм и своевременно провести необходимые медицинские мероприятия.

Для измерения активности плутония в крови в ЮУриБФ была разработана и аттестована методика измерений¹ (МИ), которая позволяет в том числе измерять содержание ²³⁹Pu в аликвоте крови. Несомненным плюсом данного метода является возможность отбора крови в любой момент, что избавляет от необходимости ожидания сбора суточных порций мочи или кала. В настоящее время в доступных литературных источниках отсутствуют сведения об использовании метода ИСП-МС при проведении аварийного ИДК; в работе [8] авторы используют

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов анализа активности плутония в биосубстратах

[Table 1]

Comparative characteristics of the methods of plutonium activity analysis in biosubstrates]

Метод анализа [Method of analysis]	Биосубстрат [Biosubstrate]	Предел обнаружения [Detection limit]	Время подготовки и измерений [Preparation and measurement duration]	Недостатки метода [Method's disadvantages]
Альфа-радиометрия [Alpha radiometry]	Аликвота мочи, 200 мл [Urine aliquot, 200 ml]	8,1 мБк-проба ⁻¹ (~65 мБк-сут ⁻¹) [8.1 mBq-sample ⁻¹ (~65 mBq-d ⁻¹)]	3–4 дня [3–4 days]	Определение суммарной альфа-активности, высокий предел обнаружения [Determination of total alpha activity, high detection limit]
Альфа-спектрометрия [Alpha spectrometry]	СКМ (б/п)* [Daily urine (non-DTPA)*]	1 мБк-сут ⁻¹ [1 mBq-d ⁻¹]	Неделя [a week]	Долгое время пробоподготовки и измерений [Long time of sample preparation and measurement]
	Аликвота мочи, 200 мл [Urine aliquot, 200 ml]	2,8 мБк-проба ⁻¹ (~22 мБк-сут ⁻¹) [2.8 mBq-sample ⁻¹ (~22 mBq-d ⁻¹)]		
ИСП-МС [ICP-MS]	СКМ (б/п)* [Daily urine (non-DTPA)*]	0,1 мБк-сут ⁻¹ [0.1 mBq-d ⁻¹]	3 дня [3 days]	Невозможность определения ²³⁸ Pu** [No possibility to determine ²³⁸ Pu]**
	Аликвота мочи, 5 мл [Urine aliquot, 5 ml]	0,1 мБк-проба ⁻¹ (~32 мБк-сут ⁻¹) [0.1 mBq-sample ⁻¹ (~32 mBq-d ⁻¹)]	3–4 ч [3–4 hours]	
	Аликвота крови, 10 мл [Blood aliquot, 10 ml]	0,1 мБк-проба ⁻¹ [0.1 mBq-sample ⁻¹]	1–1,5 дня [1–1.5 days]	

* – суточное количество мочи (далее СКМ) (берется в анализ в случаях без введения пентамина) [daily amount of urine (hereinafter 24-hour urine) is collected for analysis in cases with no DTPA administration]

** – невозможность определения ²³⁸Pu методом ИСП-МС обусловливается 2 причинами: интерференцией на аналитической массе 238 с природным ²³⁸U, присутствующим повсеместно, и небольшим периодом полураспада ²³⁸Pu по сравнению с другими изотопами плутония [the impossibility of determination of ²³⁸Pu by ICP-MS is due to two reasons: interference on the analytical mass of 238 with presented everywhere natural ²³⁸U and a short half-life of ²³⁸Pu compared to other plutonium isotopes]

¹ СП-21-3-2021 «Методика измерений активности изотопов плутония-239,240 и изотопов урана-235,238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой». Свидетельство об аттестации № СП-21-3-РА.RU.311952-2021, выдано ФГУП РФЯЦ ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина. Озерск, 2021. 38 с. [Company-specific Standard]-21-3-2021. Measurement technique for plutonium-239, 240 and uranium-235, 238 isotopes in biological samples using mass spectrometry with inductively-coupled plasma. Calibration certificate No. СП-21-3-РА.RU.311952-2021 issued by FSUE Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics. Ozersk; 2021. 38 p. (In Russ.)]

экспрессный рентгенофлуоресцентный анализ для определения плутония в крови, однако предел обнаружения данного метода в ~14 000 раз выше, чем у ИСП-МС, что позволяет использовать его только в случаях поступления сотен и тысяч ПГП.

В случае применения препаратов, ускоряющих выведение плутония (пентацин), метод ИСП-МС позволяет анализировать минимальную аликвоту мочи (до 5 мл) с минимальной пробоподготовкой без анионообменного разделения. Небольшое количество естественного урана в такой аликвоте не создает значительных интерференций на аналитической массе ^{239}Pu , что позволяет очень быстро получить результат оценки поступления ^{239}Pu (в течение 3–4 ч после отбора пробы).

Цель исследования – изучение возможностей метода ИСП-МС для измерения активности плутония в крови и моче у работников, вовлеченных в нештатные ситуации, для получения экспресс-оценки поступления.

Задачи исследования

1. Анализ используемых методов для внутренней дозиметрии плутония.
2. Разработка методики измерений активности плутония с помощью ИСП-МС.
3. Исследование метрологических характеристик метода.
4. Оценка возможностей применения ИСП-МС в аварийных ситуациях.

Материалы и методы

Масс-спектрометрия – это физический метод измерения отношения массы заряженных частиц (ионов) к их заряду. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой основана на использовании индуктивно связанной плазмы в качестве средства ионизации [9] и масс-спектрометра для разделения и детектирования ионов. Метод также позволяет проводить изотопный анализ выбранного элемента, сортирует изотопы в зависимости от отношения их массы к заряду (m/z), т.е. активность определяется по числу атомов в образце, а не по радиоактивности. В данной работе для измерений используется масс-спектрометр Agilent 8800 Triple Quad.

Измерение малых уровней активности изотопов плутония в присутствии большого количества посторонних актинидов может быть также связано с трудностью из-за спектральной интерференции гидридных ионов и хвостов от пиков соседних изотопов актинидов [10]. К примеру, точность измерения низких уровней ^{239}Pu снижается из-за мешающих ионов ^{238}U и от влияния пика от повсеместно распространенного естественного ^{238}U . Чтобы свести к минимуму эти помехи, требуется максимально полное удаление урана из образцов и применение технологии динамической реакционной ячейки [11]. Как правило, при подготовке образцов биосубстратов для масс-спектрометрических измерений используются методы предварительного концентрирования – выделение плутония из матрицы мочи методом анионообменной или экстракционной хроматографии, которые позволяют одновременное разделение ^{235}U , ^{237}Np , ^{238}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu [12, 13].

Метод измерения ИСП-МС обладает лучшим пределом обнаружения для долгоживущих изотопов, что позво-

ляет уменьшить нижнюю границу диапазона измерений ^{239}Pu в биосубстратах практически на порядок по сравнению с альфа-спектрометрическим методом анализа. К тому же для альфа-спектрометрии требуется длительный набор статистики счета (3–5 дней для детектирования на уровне НПДИ), в то время как среднее время измерения пробы с использованием ИСП-МС составляет менее 5 минут. К недостаткам метода можно отнести невозможность измерений ^{238}Pu , который также может поступать в организм человека в условиях радиационно опасного производства.

Пробоподготовка аликвоты мочи состоит из отбора 5 мл пробы, озоления в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода и измерения на ИСП-МС. Для измерений крови отбирают 10 мл, озоляют в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода (для ускорения процесса можно использовать микроволновый реактор для кислотного разложения), затем пропускают через анионообменные колонки со смолой TEVA для выделения плутония от мешающих примесей (уменьшение влияния матрицы, отделение от изотопов урана). Схема пробоподготовки крови представлена на рисунке 1.

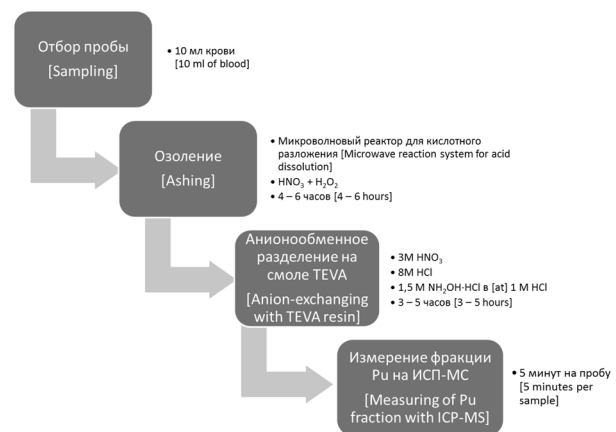


Рис. 1. Пробоподготовка крови с использованием анионообменной смолы TEVA

[Fig. 1. Blood sample preparation using anion-exchange TEVA resin]

Разделение на смоле включает в себя следующие действия: растворяют озоленный осадок в 15 мл 3 М HNO_3 , насыщают колонку 15 мл 3 М HNO_3 ; в этот момент устанавливается скорость потока в 0,5–0,6 мл/мин, 1 капля в 3–4 с, которая не должна превышать в течение всего разделения. Затем переводят раствор пробы в колонку, промывают стакан от пробы дважды небольшим количеством 3 М HNO_3 , добавляют в колонку 30 мл той же кислоты для промывки. После этого колонку промывают 30 мл 8 М HCl , а плутоний элюируют в чистый стакан с использованием 30 мл 1,5 М $\text{NH}_4\text{OH} \cdot \text{HCl}$ в 1 М HCl . Элюат выпаривают, избегая пересушивания осадка, озоляют в присутствии азотной кислоты и перекиси водорода, затем растворяют в 5 мл 5% HNO_3 (матричный раствор для анализа на ИСП-МС).

Для измерения активности плутония используют режим реакционной ячейки с подачей углекислого газа для удаления следов природного урана, присутствующего в реактивах и воздухе, поскольку катион гидроксида урана

$^{238}\text{U}^{+}$ создает интерференцию на аналитической массе ^{239}Pu . В ходе измерений детектируются импульсы от масс 239 и 242, соответствующие ^{239}Pu и ^{242}Pu . Соотношение импульсов на данных массах прямо пропорционально соотношению числа атомов изотопов в растворе. Из этого, с учетом количества введенной метки ^{242}Pu , рассчитывается активность ^{239}Pu .

Время, затраченное на пробоподготовку и измерение активности плутония в крови, обычно составляет 1–1,5 рабочих дня с момента отбора биоматериала. Пробоподготовка и измерение аликвоты мочи занимает 3–4 ч.

Результаты и обсуждение

Метрологические характеристики методики измерений

Для установления метрологических характеристик метода были выполнены исследования: у лиц, не имеющих производственного контакта с радиоактивностью, были отобраны 40 аликвот крови по 10 мл, в которые вводили метку ^{242}Pu , озолляли в присутствии азотной кислоты и перекиси до получения белого осадка, проводили анионообменное разделение плутония на смоле TEVA и растворяли в матричном растворе. Из них 16 проб были измерены для определения фоновых характеристик, в остальные 24 введены 3 различных уровня активности ^{239}Pu : 0,10, 0,50 и 4,99 мБк таким образом, что каждый уровень активности вводили в 8 проб. Работа выполнялась двумя лаборантами для определения показателей повторяемости методики анализа.

Среднее значение активности ^{239}Pu в аликвоте крови людей, не работающих в условиях производственного контакта с радиоактивностью, составило 0,089 мБк/проба, а $\sigma = \pm 0,023$ мБк/проба. Характеристики погрешности метода измерения активности ^{239}Pu в пробах крови при $P = 0,95$ представлены в таблице 2. Порог распознавания метода равен 0,054 мБк/проба.

Полученные результаты измерений проверяли по критериям Фишера и Кохрена на равенство генеральных дисперсий, а также проверяли расчетные значения смещений по критерию Стьюдента. Критерий Фишера не отрицает равенство дисперсий результатов измерения активности плутония в биосубстратах для всех серий (исполните-

лей). Критерий Кохрена также не отрицает однородность дисперсий, что позволяет за среднеквадратичное отклонение (СКО) принять среднее значение относительного СКО всех дисперсий в диапазоне. Расчетные значения t-статистики для смещений по критерию Стьюдента имеют Р-значение, превышающее установленный уровень значимости, следовательно, смещение не значимо на фоне случайного разброса результатов измерений, что говорит об отсутствии выбросов. Таким образом, аттестованная нижняя граница интервала измерений составляет 0,1 мБк в аликвоте крови 10 мл.

Для измерений аликвоты мочи 5 мл в настоящее время разрабатывается первая редакция методики измерений, но проведенные эксперименты свидетельствуют об аналогичной нижней границе интервала измерений, равной 0,1 мБк, что соответствует 32 мБк·сут⁻¹ (при объеме СКМ, равном 1600 мл).

Особенности биокинетики плутония в организме под влиянием хелатов

Основными путями проникновения радионуклидов в организм в неконтролируемых условиях являются поступление через поврежденные кожные покровы и поступление через дыхательные пути (ингаляционно) [1]. В целях предупреждения радиационных поражений или уменьшения риска их возникновения, а также для ускорения выведения и снижения скорости отложения в органах основного депонирования, в случаях острого поступления актинидов проводится курс хелатотерапии [14–19]. Поскольку хелаты изменяют биокинетику плутония, оценка поступления значительно затрудняется. В целях сохранения здоровья пострадавшего лечение начинается незамедлительно (первая инъекция пентацина делается на здравпункте ФГУП «ПО «Маяк»»), таким образом, получение пробы крови или мочи до начала хелатотерапии практически невозможно. Для достоверной оценки уровня поступления необходимо оценить фактор влияния хелата на содержание плутония в крови и моче.

Функции удержания и выведения плутония оценены по стандартным моделям НКРЗ и МКРЗ [20–22]. Влияние пентацина на биокинетику плутония рассчитано с использованием модели Konzen [23], которая разработана для

Характеристики погрешности метода измерения активности ^{239}Pu в пробах крови, $P=0,95$

Таблица 2

[Table 2]

Characteristics of the ^{239}Pu measuring method's uncertainty in blood samples, $P=0.95$

Номер ОО [No of a sample for estimation]	Число се- рий (испол- нителей) [Number of runs (operators)]	Число ре- зультатов [Number of results]	Принятое опорное зна- чение, мБк [Accepted reference value, mBq]	Среднее ариф- метическое результатов, мБк [Arithmetic mean of results, mBq]	Диапазон из- мерений, мБк [Measurement range, mBq]	Показатель повторя- емости, % [Repeatability indicator, %]	НСП, % [Residual systematic error, %]	Показатель точности, % [Accuracy rate, %]
$m = 1, \dots, M$	L	N	$C_m \pm \Delta_{o,c}$	X_m	^{239}Pu , аликвота крови [blood aliquot]			
1	2	8	$0,0999 \pm 0,0048$	0,11				
2	2	8	$0,4989 \pm 0,0240$	0,50	0,1 – 5	± 50	$\pm 9,7$	± 51
3	2	8	$4,989 \pm 0,240$	5,4				

описания биокинетики плутония под воздействием хелатов. В этой модели добавлены несколько переходных камер, которые отмечены на рисунке 2. Также полужирными линиями выделены пути экскреции комплекса Pu-DTPA. Авторами статьи рассчитаны коэффициенты перехода плутония в новые переходные камеры из них, представленные в таблице 3.

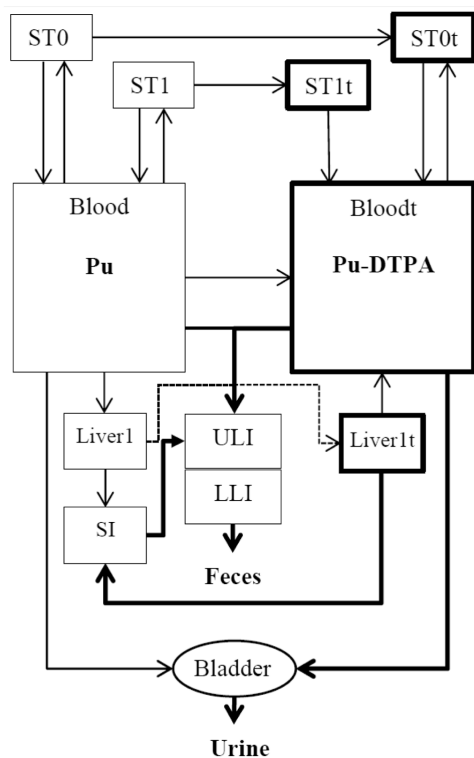


Рис. 2. Биокинетическая модель Konzen для Pu-DTPA [23]
[Fig. 2. Konzen biokinetic model for Pu-DTPA [23]]

Таблица 3
Рекомендуемые скорости перехода Pu-DTPA по модели Konzen [23]

[Table 3]

Recommended rates of Pu-DTPA transition in accordance with Konzen model	
Переход [Transition]	Скорость перехода, день ⁻¹ [Transition rate, day ⁻¹]
ST0 → ST0t	3,65
ST1 → ST1t	1,925
Blood → Bloodt	1,378
ST0t → Bloodt	300
ST1t → Bloodt	0,12
Bloodt → ST0t	145

² МУ 2.6.1.034–2014 «Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241». М.: Федеральное медико-биологическое агентство, 2014. 73 с. [Methodical guidelines 2.6.1.034–2014. “Order of Interaction between enterprises of State Atomic Energy Corporation “Rosatom” and organs and organizations of FMBA of Russia in case of non-standard (wound) and accidental inhalation intake of plutonium and americium-241 isotopes.” Moscow, Federal Medical and Biological Agency, 2014. 73 p. (In Russ.)]

Окончание таблицы 3

Переход [Transition]	Скорость перехода, день ⁻¹ [Transition rate, day ⁻¹]
Bloodt → ULI	4
Bloodt → Bladder	45,7
Liver1 → Liver 1t	2,2
Liver1t → Bloodt	0,067
Liver1t → SI	0,067
Пана [Wound]: Soluble → Blood	0,241
Пана [Wound]: Soluble → CIS	0,094
Пана [Wound]: CIS → Soluble	0,026

Также для расчетов использованы нижний предел измерений, равный 0,1 мБк ²³⁹Pu в 10 мл крови и в 5 мл мочи, объем крови и суточной мочи «среднего человека» по МКРЗ, равные 5300 и 1600 мл соответственно для мужчины [24].

Экспресс-оценка поступления плутония в случае поступления через поврежденные покровы кожи

В последнее десятилетие в условиях химико-металлургического и радиохимического производств ФГУП «ПО «Маяк»» преобладающим путем поступления актиноидов в организм при нештатных ситуациях является поступление через поврежденные кожные покровы [1].

Местом первичного депонирования при данном пути поступления является кровь, что в течение длительного времени позволяет выполнять отбор аликвоты крови с целью оценки уровней поступления и ожидаемой эффективной дозы и назначения лечения.

Согласно МУ 2.6.1.034–2014², для поступления через поврежденные покровы кожи за уровень вмешательства (иссечения) приняты 40 Бк – активность плутония, которая при непосредственном попадании в кровь приводит к ОЭД, равной 20 мЗв. Чтобы наглядно показать влияние хелатотерапии на поведение плутония в организме, по модели Konzen [23] выполнены расчеты содержания нуклида спустя 1-е сутки после поступления 40 Бк плутония (табл. 4).

Можно отметить, что введение пентацина значительно ускоряет выведение из организма с мочой и снижает отложение плутония в скелете, печени и мягких тканях, но и также в разы уменьшает его содержание в крови.

С использованием методики анализа аликвоты крови методом ИСП-МС в течение 3 дней после непосредственного поступления ²³⁹Pu в кровь по модели Konzen возможно определить 40 Бк поступления плутония. Однако в такие сроки разница с естественным содержанием плу-

Таблица 4

Содержание плутония в органах и тканях спустя 24 ч после поступления 40 Бк ²³⁹Pu непосредственно в кровь

[Table 4]

Plutonium activity in organs and tissues 24 hours after the intake of 40 Bq of ²³⁹Pu directly into the blood

Содержание в органе, Бк [Activity in organ, Bq]	Кровь [Blood]	Скелет [Skeleton]	Печень [Liver]	Мягкие ткани [Soft tissues]	Почки + моче- вой пузырь [Kidneys + bladder]	ЖКТ [GIT]	СКМ [24- hour urine]	Кал [Feces]
Без проведения хелатотера- пии [without chelation therapy]	17,6	8,7	5,2	7,6	0,3	0,3	0,3	0,1
С проведением хелатотерапии [with chelation therapy]	4,4	5,1	2,9	2,0	0,9	1,8	22,3	0,5

тония в крови колоссальна и составляет практически два порядка. Поскольку к настоящему времени в доступных литературных источниках отсутствует информация об исследованиях влияния пентацина на содержание плутония в крови, оценки, выполненные на основании модели *Konzen*, не подтверждены экспериментальными данными. Вследствие этого рекомендуется производить отбор крови в первые часы после поступления, когда расчетные значения содержания плутония в крови по стандартной модели и модели *Konzen* практически не отличаются; в идеальном случае отбор крови должен производиться до или в момент введения пентацина. В течение первых суток можно определить от 0,1 до 1,2% от 40 Бк поступления на основании результатов измерения содержания плутония в крови. С анализом аликвоты мочи можно определить 0,03 Бк·сут⁻¹, что позволяет определить 0,13% от 40 Бк поступления в первые сутки после поступления. Учитывая несомненную оперативность метода, его стоит использовать для экспресс-оценки поступления, но так как неопределенность дозы при измерении в первичном депо – крови, будет меньше, в случае поступления плутония через поврежденные покровы кожи следует проводить оба анализа. После получения экспресс-оценки методом ИСП-МС следует в зависимости от уровней поступления выполнить дозиметрическое сопровождение согласно требованиям актуальных методических документов, используя МВИ³.

Экспресс-оценка поступления плутония в случаях ингаляционного поступления

При ингаляционном поступлении местом первичного депонирования являются легкие, затем плутоний быстро перераспределяется в организме. Содержание плутония в крови быстро падает, поэтому в этом случае аликвоту крови целесообразно отбирать в течение 1-х суток после поступления.

Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009)⁴, предел годового поступления (ПГП) для про-

межуточных соединений равен 78 Бк, а для труднорастворимых соединений – 1300 Бк. Как и в случае поступления через поврежденные покровы кожи, введение пентацина значительно ускоряет выведение из организма с мочой и снижает отложение плутония в скелете, печени и мягких тканях, а также существенно уменьшает его содержание в крови. В моче в течение первого дня после поступления 1 ПГП промежуточных соединений с пентацином выведется 1,07 Бк·сут⁻¹, а труднорастворимых – 0,18 Бк·сут⁻¹.

Согласно модели *Konzen*, для промежуточных соединений в течение первых 2 дней (43 ч после поступления) возможно определить менее 1 ПГП на основании результатов измерения содержания плутония в крови. Как и для случаев поступления плутония через поврежденные покровы кожи, рекомендуется отбирать кровь в первые часы после поступления, наиболее эффективно производить отбор до или в момент введения пентацина. В течение первых суток можно определить от 3 до 23% от 78 Бк поступления. В случае анализа аликвоты мочи в первые сутки определяется 3% от 78 Бк поступления. Для труднорастворимых соединений в течение первых суток (21 ч после поступления) возможно определить менее 1 ПГП. В течение первых 12 ч можно определить от 18 до 47% от 1300 Бк поступления. В случае анализа аликвоты мочи в 1-е сутки определяется 17% от 1300 Бк поступления, чего может быть недостаточно для целей аварийного индивидуального дозиметрического контроля (рекомендуется измерять 10% от ПГП). При вероятности поступления труднорастворимых соединений рекомендуется отбирать большие аликвоты биосубстратов.

Учитывая несомненную оперативность метода анализа аликвоты мочи, его стоит использовать для экспресс-оценки поступления всех рассмотренных типов соединений плутония. Но так как неопределенность дозы при измерении в крови будет меньше, в случае ингаляционных поступлений следует проводить оба анализа. После получения экспресс-оценки методом ИСП-МС следует, в зависимости от уровней поступления, выполнить дози-

³ «Методика выполнения измерений изотопов плутония и америция в образцах мочи и кала в условиях повышенной экскреции, стимулированной введением пентацина, у работников радиохимических производств». Озерск, 2011. 40 с. [Measurement technique for plutonium and americium isotopes in urine and fecal samples collected from radiochemical production workers in conditions of increased excretion stimulated by pentacine administration. Ozersk, 2011. 40 p. (In Russ.)].

⁴ СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [SanPiN 2.6.1.2523-09. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary Regulations and Standards Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russ.)]

метрическое сопровождение согласно требованиям актуальных методических документов, используя МВИ⁵.

Результаты применения метода ИСП-МС в аварийных ситуациях

Для дозиметрического сопровождения случаев поступления через поврежденные покровы кожи и аварийном ингаляционном поступлении метод масс-спектрометрии (экспресс-измерения аликвоты мочи) применяется в качестве предварительной оценки. Следующим шагом является измерение пробы на альфа-спектрометре для окончательной оценки. Сравнение результатов измерений содержания плутония в СКМ методом ИСП-МС и методом альфа-спектрометрии, проведенных с момента внедрения метода в ЮУрИБФ, приведено в таблице 5.

Таблица 5

Результаты измерений активности плутония методом ИСП-МС и методом альфа-спектрометрии в СКМ

[Table 5]

Results of plutonium activity measurements in 24-hour urine samples using ICP-MS and alpha spectrometry

№ п/п [S No]	Активность $^{239+240}\text{Pu}$, мБк/СКМ [Activity of $^{239+240}\text{Pu}$, mBq/24-urine]		Относительная ошибка, % [Relative error, %]
	ИСП-МС [ICP-MS]	Альфа- спектрометрия [Alpha spectrometry]	
1	238	255	6,5
2	148	123	20,3
3	31,7	30	5,6
4	113	103	9,7
5	$14,4 \cdot 10^3$	$12,8 \cdot 10^3$	12,2
6	$25,0 \cdot 10^2$	$23,2 \cdot 10^2$	7,9
7	717	733	2,3
8	227	178	27,1
9	130	112	16,4

Полученные данные показывают высокую сходимость результатов, полученных как экспресс-измерениями практически без пробоподготовки в течение нескольких часов, так и методом альфа-спектрометрии, который нуждается в продолжительной и трудоемкой радиохимической подготовке и в длительных измерениях, занимающих около недели. Относительная ошибка не превышает 27,1%, что практически в два раза ниже относительной суммарной погрешности используемых методик. Это свидетельствует о целесообразности применения метода ИСП-МС для предварительной оценки дозовой нагрузки, обусловленной поступлением ^{239}Pu и ^{240}Pu работникам, вовлеченным в нештатные ситуации.

Следует отметить, что экспресс-оценка может быть занижена из-за вероятности присутствия в поступившей смеси ^{238}Pu и ^{241}Am . Существенным недостатком метода

ИСП-МС является невозможность определения ^{238}Pu на приемлемом уровне, что может привести к недооценке дозы в случаях поступления этого изотопа.

Заключение

Выполненные исследования по оценке применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для получения экспресс-оценки поступления плутония по содержанию в крови показали, что данный метод целесообразно применять в течение первых часов после регистрации факта ингаляционного поступления или повреждения кожных покровов и загрязнения их актинидами. Использование результатов измерения активности плутония в аликвоте мочи также целесообразно для первичной оценки поступления.

Предел обнаружения метода, составляющий 0,1 мБк ^{239}Pu в 10 мл крови (в 5 мл мочи), позволяет определять 0,1–1,2% от 40 Бк в 1-е сутки при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы (0,13% от 40 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи), 3–23% от 78 Бк в 1-е сутки при ингаляционном поступлении промежуточных соединений плутония (3% от 78 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи), 18–47% от 1300 Бк в первые 12 ч при ингаляционном поступлении труднорастворимых соединений плутония (17% от 1300 Бк в 1-е сутки при экспресс-анализе аликвоты мочи).

Метод альфа-спектрометрии необходим для всех случаев поступления актинидов при возникновении нештатной ситуации для корректной оценки содержания ^{238}Pu и ^{241}Am . Чтобы модифицирующее влияние хелатотерапии при получении оценок поступления отсутствовало, пробу крови рекомендуется отбирать до момента введения пентацина.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Баталов В.Р. выполнил разработку методики измерений, собрал и проанализировал данные, написал черновик рукописи и представил окончательный вариант статьи в редакцию журнала.

Соколова А.Б. выполнила анализ литературы и полученных данных, а также отредактировала промежуточный вариант статьи.

Ефимов А.В. осуществил общее руководство выполнением работы, отредактировал и утвердил окончательный вариант статьи для публикации.

Джунушалиев А.Б. провел моделирование экскреции плутония при различных сценариях поступления и отредактировал промежуточный вариант статьи.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела радиационной безопасности и дозиметрии ЮУрИБФ за помощь в радиохимической подготовке проб. Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить качество статьи.

⁵ «Методика выполнения измерений изотопов плутония и америция в образцах мочи и кала в условиях повышенной экскреции, стимулированной введением пентацина, у работников радиохимических производств». Озерск, 2011. 40 с. [Measurement technique for plutonium and americium isotopes in urine and fecal samples collected from radiochemical production workers in conditions of increased excretion stimulated by pentacine administration. Ozersk, 2011. 40 p. (In Russ.)].

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена в рамках Государственного задания Российской Федерации «Развитие научно-методического обеспечения индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения» код – 11.303.22.2 шифр «Контроль-22», финансируемого ФМБА России.

Литература

- Соколова А.Б., Ефимов А.В. Современное состояние системы дозиметрического сопровождения случаев острого поступления актинидов у работников ПО «Маяк» // Вопросы Радиационной Безопасности. Федеральное государственное унитарное предприятие Производственное объединение Маяк, 2018. № 3 (91), С. 56–64.
- Хохряков В.В., Хохряков В.Ф., Суслова К.Г. и др. Состояние и перспективы развития дозиметрии внутреннего облучения персонала ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2004. Т. 3, С. 25–40.
- Gajek R., Barley F., She J. Determination of essential and toxic metals in blood by ICP-MS with calibration in synthetic matrix // Analytical Methods. The Royal Society of Chemistry, 2013. Vol. 5, № 9. P. 2193–2202.
- Palmer C.D., Lewis M.E., Geraghty C.M. et al. Determination of lead, cadmium and mercury in blood for assessment of environmental exposure: A comparison between inductively coupled plasma-mass spectrometry and atomic absorption spectrometry // Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. 2006. Vol. 61, № 8. P. 980–990.
- Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Вейхман Г.А. и др. Пат. № 2585369 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/84. Способ определения содержания кадмия, свинца, мышьяка, хрома, никеля, меди, цинка, марганца, ванадия, стронция, селена, таллия в крови методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, опубл. 27.05.2016.
- Уланова Т.С., Гилева О.В., Стенно Е.В. и др. Определение стронция в цельной крови и моче методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Биомедицинская Химия. НИИ биомедицинской химии имени В.Н. Ореховича, 2015. Т. 61, № 5, С. 613–616.
- Уланова Т.С., Стенно Е.В., Вейхман Г.А. и др. Оценка содержания токсичных микроэлементов в крови рабочих машиностроительного предприятия // Методы и Объекты Химического Анализа. 2013. Т. 8, № 2, С. 72–75.
- Izumoto Y., Fukutsu K., Takamura K. et al. Rapid detection of plutonium contamination with and without uranium contamination in wounds by x-ray fluorescence // Journal of Radiology Protection. IOP Publishing, 2020. Vol. 40, № 3. P. 692–703.
- Музгин В.Н., Емельянова Н.Н., Пупышев А.А. Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой – новый метод в аналитической химии // Аналитика и Контроль. 1998. Т. 2, № 3–4, С. 3–25.
- Каменев А.Г., Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В. и др. Масс-спектрометрический анализ изотопного состава актинидов в ультра-малых пробах. Тезисы докладов Всероссийской Конференции «Химический анализ веществ и материалов». Москва, 16-20 апреля, 2000. М., 2000. С. 366–367.
- Чубинский-Надеждин И.В., Куликов Ю.В., Каменев А.Г. и др. Чувствительность и пределы обнаружения при масс-спектрометрическом анализе ультрамалых проб урана и плутония // Научное Приборостроение. 2003. Т. 13, № 1, С. 24–31.
- Xu Y., Qiao J., Hou X. et al. Determination of plutonium isotopes (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) in environmental samples using radiochemical separation combined with radiometric and mass spectrometric measurements // Talanta. 2014. Vol. 119. P. 590–595.
- Epov V.N., Evans R.D., Zheng J. et al. Rapid fingerprinting of ^{239}Pu and ^{240}Pu in environmental samples with high U levels using on-line ion chromatography coupled with high-sensitivity quadrupole ICP-MS detection // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2007. Vol. 22, № 9. P. 1131–1137.
- Smith V.H. Therapeutic removal of internally deposited transuranium elements // Health Physics. 1972. Vol. 22, № 6. P. 765–778.
- Volf V. Optimisation and Status of Chelation Therapy // Radiation Protection Dosimetry. Oxford Academic, 1989. Vol. 26, № 1–4. P. 331–335.
- Сохранич А.Л., Кабинова Н.Р., Любчанский Э.Р. Пат. № 2051682 Российская Федерация, МПК А61К 33/30. Способ профилактики поражения плутонием-239 в ранние сроки, опубл. 10.01.1996.
- Сохранич А.Л., Любчанский Э.Р. Пат. № 2026066 С1 Российская Федерация, МПК А61К 9/12, А61К 33/00. Способ выведения из организма плутония-239, поступившего через легкие, опубл. 09.01.1995.
- Singh V.K., Romaine P.L.P., Seed T.M. Medical Countermeasures for Radiation Exposure and Related Injuries: Characterization of Medicines, FDA-Approval Status and Inclusion into the Strategic National Stockpile // Health Physics. 2015. Vol. 108, № 6. P. 607–630.
- Bhattacharyya M.H., Breitenstein B.D., Metivier H. et al. Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers // Radiation Protection Dosimetry. 1992. Vol. 41, № 1. P. 1–49.
- Vennart J. Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30 // Health Physics. 1981. Vol. 40, № 4. P. 477–484.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4), 1993.
- NCRP Report No 156, Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment Radium History Mosaic Report No 157, Radiation Protection in Educational Institutions // Journal of Radiology Protection. IOP Publishing, 2008. Vol. 28, № 2. P. 261–264.
- Konzen K., Brey R. Development of the Plutonium-DTPA Biokinetic Model // Health Physics. 2015. Vol. 108, № 6. P. 565–573.
- Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89 // Ann. ICRP. 2002. Vol. 32, № 3. P. 1–277.

Поступила: 15.08.2022 г.

Баталов Вадим Робертович – исполняющий обязанности младшего научного сотрудника Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства. Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19, E-mail: vrbatalov@mail.ru

ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-8807-9494>

Соколова Александра Борисовна – научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Ефимов Александр Владимирович – заведующий отделом радиационной безопасности и дозиметрии Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Джунушалиев Артем Борисович – инженер-программист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-0906-6463>

Для цитирования: Баталов В.Р., Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Оценка применимости метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для задач специального индивидуального дозиметрического контроля // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 77-87. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-77-87

Evaluation of the applicability of the inductively coupled plasma mass spectrometry method for special individual dosimetry monitoring

Vadim R. Batalov, Alexandra B. Sokolova, Alexander V. Efimov, Artem B. Dzhenushaliev

Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

In the condition of modern radiation hazardous production, higher levels of personnel internal exposure are mainly due to the intake of radionuclides in situations caused by faulty equipment or wrong actions of personnel which can or do result in the exposure that exceeds established standards. In such cases, to determine the intake and committed effective dose, daily amount of urine and/or feces is collected followed by the preparation of loads and their subsequent measurements. For a total, it takes three to eight days to obtain the result depending on the method of measurement used. In case of acute intake of plutonium, it is important to estimate the levels of the nuclide intake as soon as possible in order to decide on treatment strategy and dose reduction. To achieve the above goal, the Southern Urals Biophysics Institute has developed a technique for measuring the plutonium-239 activity in blood using an inductively coupled plasma mass spectrometer as in the first hours and 24 hours after intake (through inhalation or damaged skin) the radionuclide concentration in blood is at its maximum level. Also a method has been developed to measure plutonium in urine aliquot using mass-spectrometry to perform special individual dosimetry monitoring that requires almost no sample preparation which allows to estimate the intake within a few hours. It is shown that, depending on the route of intake and chemical form of plutonium compounds entered, the measurement of plutonium activity in blood and urine aliquot performed by the inductively coupled plasma mass spectrometer method allows to determine from 0.1 to 47% of intake limit within the first 24 hours after an accident. The analysis of a blood sample takes one to one-and-a-half workdays against a week required to analyze a urine sample using alpha-spectrometry. The application of the developed methodology, apart from the goal of individual dosimetry monitoring, will provide new information on the effects of chelation therapy on the plutonium behavior in the human body.

Key words: *inductively coupled plasma mass-spectrometry, plutonium, blood, urine, internal dosimetry.*

Vadim R. Batalov

Southern Urals Biophysics Institute

Address for correspondence: Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: vrbatalov@mail.ru

Authors' personal contribution

Batalov V.R. performed the development of the measuring technique, collected and analyzed data, prepared the article draft and represented the final version of the manuscript for publication in the journal.

Sokolova A.B. analyzed literature and the obtained data, revised an intermediate version of the manuscript.

Efimov A.V. provided general management of the project, edited and approved the final version of the manuscript.

Dzhunushaliev A.B. performed the modelling of plutonium excretion under different intake scenarios and revised an intermediate version of the manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to thank the employees of the SUBI's Internal Dosimetry Laboratory for their help in radiochemical preparation of samples. The authors are also grateful to the reviewers for constructive comments and suggestions that have significantly improved the quality of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflicts of interest when conducting the study and preparing this article.

Sources of funding

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Russian Federation "Development of scientific and methodological support for individual dosimetry monitoring of occupational internal exposure" code – 11.303.22.2 name code "Control-22", funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

References

- Sokolova AB, Efimov AV. Current State of the Dosimetry Monitoring of Acute Actinide Intakes on the Mayak PA Workers. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2018;3(91): 56-64 (In Russian).
- Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, et al. Status and Prospects of the Internal Dosimetry for "Mayak" PA Personnel. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2004;3(35): 25-40 (In Russian).
- Gajek R, Barley F, She J. Determination of essential and toxic metals in blood by ICP-MS with calibration in synthetic matrix. *Analytical Methods. The Royal Society of Chemistry*, 2013;5(9): 2193–2202.
- Palmer CD, Lewis ME, Geraghty CM, et al. Determination of lead, cadmium and mercury in blood for assessment of environmental exposure: A comparison between inductively coupled plasma–mass spectrometry and atomic absorption spectrometry. *Spectrochimica. Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2006;61(8): 980–990.
- Zaytseva NV, Ulanova TS, Veykhman GA, et al. Pat. 2585369 C1 Russian Federation, IPC G01N 33/84. Method of Determining Content of Cadmium, Lead, Arsenic, Chromium, Nickel, Copper, Zinc, Manganese, Vanadium, Strontium, Selenium, Thallium in Blood by Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma, publ. 27.05.2016 (In Russian).
- Ulanova TS, Gileva OV, Stenno EV, et al. Determination of Strontium Content in Whole Blood and Urine by ICP-MS. *Biomeditsinskaya khimiya = Biomedical Chemistry*. Scientific Research Institute of Biomedical Chemistry named after V.N. Orekhovich. 2015;61(5): 613–616 (In Russian).
- Ulanova TS, Stenno EV, Veykhman GA, et al. Evaluation of Toxic Trace Elements in the Blood of Machine-Building Plant Workers. *Metody i objekty khimicheskogo analiza = Methods and Objects of Chemical Analysis*. Taras Shevchenko National University of Kyiv. 2013;8(2): 72–75 (In Russian).
- Izumoto Y, Fukutsu K, Takamura K, et al. Rapid detection of plutonium contamination with and without uranium contamination in wounds by x-ray fluorescence. *Journal of Radiological Protection*. IOP Publishing. 2020;40(3): 692–703.
- Muzgin VN, Emelyanova NN, Pupyshev AA. Mass Spectrometry with Inductively Coupled Plasma – a New Method in Analytical Chemistry. *Analitika i Kontrol = Analytics and Control*. 1998;2(3–4): 3–25 (In Russian).
- Kamenev AG, Chubinskiy-Nadezhdin IV, Kulikov YuV, et al. Mass Spectrometric Analysis of Isotopic Composition of Actinides in Ultra-small Samples. Abstracts of the All-Russian Conference "Chemical analysis of substances and materials". Moscow, 16-20 April, 2000. Moscow, 2000. P. 366–367 (In Russian).
- Chubinskiy-Nadezhdin IV, Kulikov YuV, Kamenev AG, et al. Sensitivity and Detection Limits in Mass Spectrometric Analysis of Ultra-small Samples of Uranium and Plutonium. *Nauchnoe Priborostroenie = Scientific Instrumentation*. 2003;13(1): 24–31 (In Russian).
- Xu Y, Qiao J, Hou X, et al. Determination of plutonium isotopes (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu) in environmental samples using radiochemical separation combined with radiometric and mass spectrometric measurements. *Talanta*. 2014;119: 590–595.
- Epov VN, Evans RD, Zheng J, et al. Rapid fingerprinting of ^{239}Pu and ^{240}Pu in environmental samples with high U levels using on-line ion chromatography coupled with high-sensitivity quadrupole ICP-MS detection. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2007;22(9): 1131–1137.
- Smith VH. Therapeutic removal of internally deposited transuranium elements. *Health Physics*. 1972;22(6): 765–778.
- Volf V. Optimisation and Status of Chelation Therapy. *Radiation Protection Dosimetry*. Oxford Academic. 1989;26(1–4): 331–335.
- Sokhranich AL, Kabirova NR, Lyubchansky EhR. Pat. RU 2051682 Russian Federation, IPS A61K 33/30. Method of Plutonium-239 Damage Prophylaxis in the Early Period. 1996 (In Russian).
- Sokhranich AL, Lyubchansky EhR. Pat. RU 2026066 C1 Russian Federation, IPS A61K 9/12, A61K 33/00. Method for Removing Plutonium-239 Ingressed Via Lungs. 1995(In Russian).
- Singh VK, Romaine PLP, Seed TM. Medical Countermeasures for Radiation Exposure and Related Injuries: Characterization of Medicines, FDA-Approval Status and Inclusion into the Strategic National Stockpile. *Health Physics*. 2015;108(6): 607–630.
- Bhattacharyya MH, Breitenstein BD, Metivier H, et al. Guidebook for the treatment of accidental internal radionuclide contamination of workers. *Radiation Protection Dosimetry*. 1992;41(1): 1–49.
- Vennart J. Limits for intakes of radionuclides by workers: ICRP Publication 30. *Health Physics*. 1981;40(4): 477–484.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides – Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP 23 (3-4), 1993.
- NCRP Report No 156, Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment Radium History Mosaic Report No 157, Radiation Protection in Educational Institutions. *Journal of Radiological Protection*. IOP Publishing, 2008;28(2): 261–264.
- Konzen K, Brey R. Development of the Plutonium-DTPA Biokinetic Model. *Health Physics*. 2015;108(6): 565–573.
- Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: reference values: ICRP Publication 89. Ann. ICRP. 2002; 32 (3): 1–277.

Received: August 15, 2022

For correspondence: Vadim R. Batalov – Junior Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: vrbatalov@mail.ru)

ORCID  <https://orcid.org/0000-0001-8807-9494>

Alexandra B. Sokolova – Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0002-6036-4178>

Alexander V. Efimov – Head of Department of Radiation Safety and Dosimetry, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-1110-6559>

Artem B. Dzhunushaliev – Programmer engineer, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency, Ozersk, Russia

ORCID  <https://orcid.org/0000-0003-0906-6463>

For citation: Batalov V.R., Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B. Evaluation of the applicability of the inductively coupled plasma mass spectrometry method for special individual dosimetry monitoring. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4. P. 77-87. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-77-87