

## Анализ соответствия действующей системы индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, актуальным рекомендациям МКРЗ

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

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

*Индивидуальный дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония в организм, производится методом биофизического обследования, при котором выполняются измерения содержания изотопов плутония в пробах суточного количества мочи. Далее для оценки нормируемых величин (ожидаемой эффективной дозы и поступления) используются биокинетические и дозиметрические модели. Действующие в настоящее время основные документы Российской Федерации в области обеспечения радиационной безопасности опираются на требования и подходы, изложенные Международной комиссией по радиологической защите в Публикациях 68, 78. При внедрении в практику требований Публикации 130 возникнет необходимость в актуализации отечественных методических документов новым требованиям. Целью данной работы был анализ соответствия действующей системы индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, актуальным требованиям Международной комиссии по радиологической защите, изложенным в Публикации 130, на примере условий производства «Производственного объединения «Маяк»». В результате исследования определены величины пределов годового поступления плутония на основании новых биокинетических и дозиметрических моделей, рассчитаны значения измеряемых величин при проведении текущего дозиметрического контроля, соответствующие значению предела ожидаемой эффективной дозы для персонала категорий А, Б и женщин в возрасте до 45 лет. Получено, что при введении новых требований Международной комиссии по радиологической защите для соединений типа П поступление более 1/4 предела годового поступления плутония может быть определено в течение года после поступления методом альфа-спектрометрии. Для определения поступления в 1/20 предела годового поступления при рекомендуемом интервале между измерениями 180 суток необходимо использовать метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Для персонала, работающего с труднорастворимыми соединениями плутония типа М, определение поступления одного предела годового поступления и 1/4 предела годового поступления возможно методом масс-спектрометрии, а 1/20 предела годового поступления — только еще более чувствительным методом.*

**Ключевые слова:** плутоний, внутреннее облучение, индивидуальный дозиметрический контроль, биофизическое обследование.

### Введение

Система контроля профессионального внутреннего облучения должна отвечать требованиям, выработанным международным профессиональным сообществом, и позволять получать достоверную информацию об индивидуальных дозах внутреннего облучения персонала для обеспечения выполнения требований норм ради-

ационной безопасности в части определения степени соблюдения принципов радиационной безопасности и требований нормативов<sup>1</sup> [1]. Нормативное и методическое обеспечение системы дозиметрического контроля включает ряд базовых документов, устанавливающих требования к методам определения индивидуальных доз облучения, планированию, организации и проведению

<sup>1</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary Regulations and Standards SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by Decision No.47 of 07.07.2009 by Chief of Public Health of the Russian Federation. Registered in Ministry of Justice of the Russian Federation on 14 August, 2009, registration No.14534. (In Russ.)]

Соколова Александра Борисовна

Южно-Уральский институт биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, г. Озерск, Озерское шоссе, д. 19

дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала<sup>2,3</sup>. Нормируемыми величинами при внутреннем облучении персонала в контролируемых условиях обращения с радиоактивными веществами в открытом виде являются: ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения (ОЭД) и величина поступления в организм работника через органы дыхания соединений радионуклида, отнесенного к типу химического соединения при ингаляции и дисперсности вдыхаемых аэрозолей.

Определение индивидуальных доз внутреннего облучения осуществляется в 2 этапа, заключающихся в:

- выполнении измерений содержания (активности) радионуклидов прямым методом дозиметрии (*in vivo*) во всем теле человека или отдельных его органах путем измерения на спектрометре излучения человека; либо косвенным методом дозиметрии (*in vitro*) в экскретах (моча или кал) или других пробах биологического происхождения;

- интерпретации результатов указанных измерений, т.е. определении значений величин поступления радионуклидов за год и ОЭД внутреннего облучения с использованием биокинетических и дозиметрических моделей.

Нормы и Правила радиационной безопасности (НРБ-99/2009 и ОСПОРБ 99/2010), действующие в Российской Федерации<sup>4</sup>, опираются на требования и подходы, изложенные Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) в Публикациях 68, 78, в которых для оценки основных нормируемых величин использованы биокинетические модели МКРЗ, представленные в Публикациях 30, 66, 67 [2–8]. При внедрении в практику современных требований МКРЗ отечественные методические документы должны быть актуализированы с учетом новых подходов и новых биокинетических и дозиметрических моделей, представленных МКРЗ в Публикациях 130, 134, 137, 141 [9–12].

**Цель исследования** – анализ соответствия действующей системы индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, актуальным требованиям МКРЗ. Исследование выполнялось на примере условий производства ФГУП «ПО «Маяк»».

### Задачи исследования

Определение значений нормируемых величин, а именно предела годового поступления (ПГП), на основании новых подходов МКРЗ, а также анализ возможности использования применяемых методов измерений для целей индивидуального дозиметрического контроля в случае внедрения новых требований МКРЗ.

### Результаты и обсуждение

Индивидуальный дозиметрический контроль внутреннего облучения, обусловленного поступлением актинидов в организм работников ФГУП «ПО «Маяк»», осуществляется двумя методами – методом биофизического обследования, при котором выполняются измерения содержания изотопов <sup>238</sup>Pu и <sup>239+240</sup>Pu в пробах суточного количества мочи (СКМ), и путем обследования на спектрометре излучения человека (СИЧ), при котором проводятся измерения содержания <sup>241</sup>Am в легких на установках СИЧ. Для оценки величины поступления используются биокинетические модели МКРЗ (далее стандартные модели МКРЗ): в Публикации 66 МКРЗ представлена модель дыхательного тракта (HRTM – the ICRP human respiratory tract model), в Публикации 30 МКРЗ – модель желудочно-кишечного тракта (GITM – gastrointestinal tract model), в Публикации 67 МКРЗ – модель, описывающая поведение радионуклидов, попавших в кровь [3, 5, 6].

В настоящее время МКРЗ выпустила новую серию публикаций OIR (the Occupational Intakes of Radionuclides), включающую Публикации 130, 134, 137, 141 (далее OIR-модели) [9–12]. Данные работы, в которых описывается оценка поступления, биокинетические и дозиметрические модели, методы индивидуального мониторинга, а также базовые аспекты ретроспективных оценок доз, заменяют Публикации 30, 68 и 78 [2, 3, 7, 8]. В Публикациях 134, 137, 141 предоставлены данные об отдельных элементах и их изотопах, в том числе информация о химических формах, значения параметров биокинетической модели, данные о методах контроля поступления радионуклидов, встречающихся в условиях профессионального контакта с источниками ионизирующего излучения. В Публикации 130 МКРЗ представлена модифицированная модель дыхательного тракта, предложенная вместо модели Публикации 66 МКРЗ [9, 5]. Основные характеристики модели остались неизменными, большая часть изменений коснулась механического клиренса частиц.

Пересмотренные данные по ингаляции, заглатыванию, системной биокинетике для плутония представлены в Публикации 141 МКРЗ, в которой опубликованы обновленные значения параметров для соединений плутония, в том числе добавлены новые формы соединений – наночастицы, МОКС-соединения [12]. Модель желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) Публикации 30 МКРЗ [2] HATM (the ICRP human alimentary tract model) заменена на модель ЖКТ, представленную в Публикации 100 МКРЗ [13]. В отличие от модели Публикации 30 МКРЗ, новая HATM рассматривает все области ЖКТ, включая пищевод и полость

<sup>2</sup> МУ 2.6.1.065-2014. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования. Москва, 2014. 46 с. [Methodological Guidelines 2.6.1.065-2014. Dosimetry control of occupational internal exposure. General requirements. Moscow, 2014. 46 p. (In Russ.)]

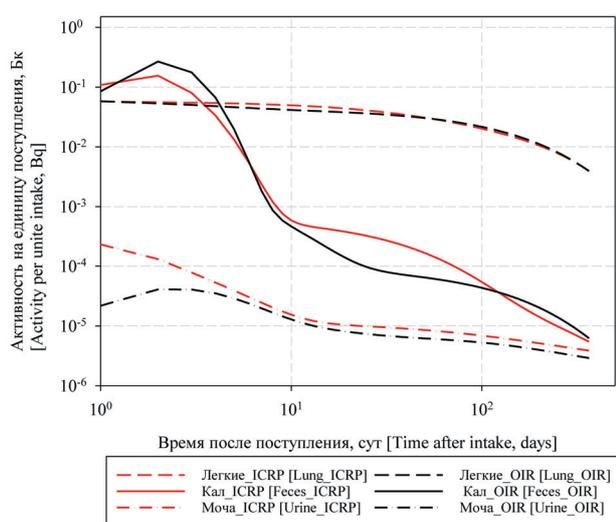
<sup>3</sup> МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования. Москва, 2016. 108 с. [Methodological Guidelines 2.6.5.028-2016. Determination of individual effective and equivalent doses and organization of the control of occupational exposure under the conditions of the planned exposure. General requirements. Moscow, 2016, 108 p. (In Russ.)]

<sup>4</sup> СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы (в редакции изменения № 1, утвержденного Постановлением Главного государственного врача Российской Федерации от 16.09.2013 г. № 43). Зарегистрировано Минюстом России 05.11.2013, регистрационный № 30309. [Sanitary Regulations 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for radiation safety (BSRRS 99/2010): Sanitary regulations and standards (as amended to Change No.1 approved by Decision No.43 of 16 September 2013 by Chief of Public Health of the Russian Federation). Registered in Ministry of Justice of the Russian Federation on 05.11.2013, registration No.30309. (In Russ.)]

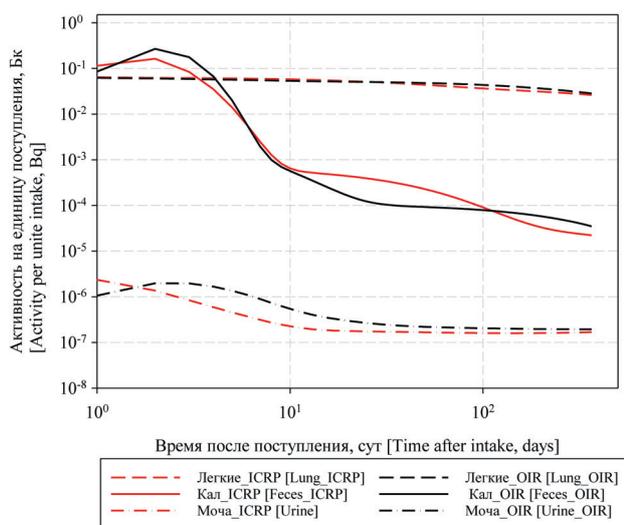
рта, введены новые камеры стенок органов ЖКТ с возможным поглощением и выведением в кровь.

Согласно НРБ-99/2009, для целей нормирования поступления радионуклидов через органы дыхания в форме радиоактивных аэрозолей их химические соединения разделены на 3 типа в зависимости от скорости перехода радионуклида из легких в кровь: тип М (медленно растворимые соединения), тип П (соединения, растворимые с промежуточной скоростью), тип Б (быстро растворимые соединения). Соединения  $^{239}\text{Pu}$  отнесены к типам П и М.

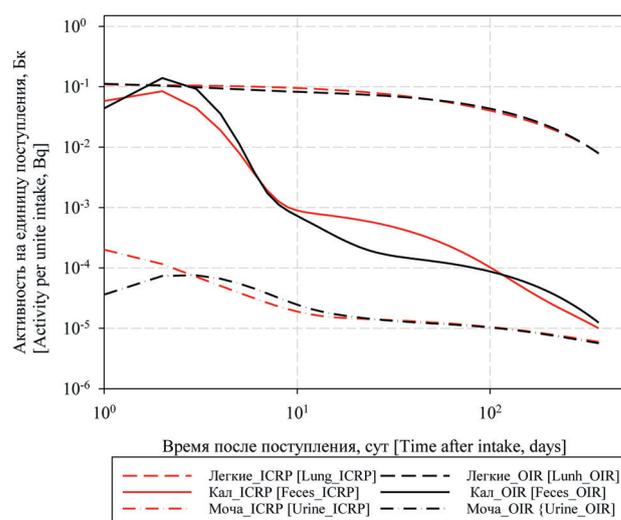
На рисунках 1–4 представлены функции удержания и выведения  $^{239}\text{Pu}$  при однократном ингаляционном поступлении для стандартных моделей МКРЗ и OIR-модели для соединений типа П и М с активностным медианным аэродинамическим диаметром (АМАД) 1 и 5 мкм.



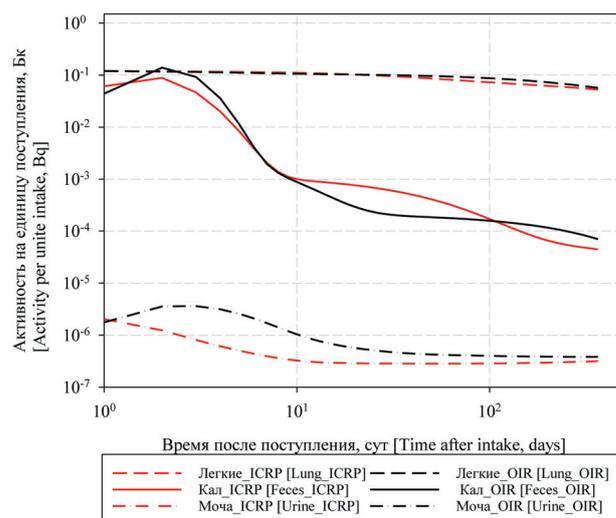
**Рис. 1.** Функции удержания и выведения  $^{239}\text{Pu}$  типа П АМАД 5 мкм согласно стандартным моделям МКРЗ и OIR-модели [Fig. 1. Functions of retention and excretion of Type M  $^{239}\text{Pu}$  with 5 μm AMAD in accordance with standard ICRP models and OIR model]



**Рис. 2.** Функции удержания и выведения  $^{239}\text{Pu}$  типа М АМАД 5 мкм согласно стандартным моделям МКРЗ и OIR-модели [Fig. 2. Functions of retention and excretion of Type S  $^{239}\text{Pu}$  with 5 μm AMAD in accordance with standard ICRP models and OIR model]



**Рис. 3.** Функции удержания и выведения  $^{239}\text{Pu}$  типа П АМАД 1 мкм согласно стандартным моделям МКРЗ и OIR-модели [Fig. 3. Functions of retention and excretion of Type M  $^{239}\text{Pu}$  with 1 μm AMAD in accordance with standard ICRP models and OIR model]



**Рис. 4.** Функции удержания и выведения  $^{239}\text{Pu}$  типа М АМАД 1 мкм согласно стандартным моделям МКРЗ и OIR-модели [Fig. 4. Functions of retention and excretion of Type S  $^{239}\text{Pu}$  with 1 μm AMAD in accordance with standard ICRP models and OIR model]

Из данных рисунков 1–4 следует, что основные различия динамики выведения  $^{239}\text{Pu}$  (до порядка величины) для сравниваемых моделей наблюдаются в первые 30 суток после поступления, с увеличением сроков после поступления скорость выведения различается в 1,2–2 раза.

В таблице 1 представлены дозовые коэффициенты перехода от оценок поступления к оценкам ОЭД внутреннего облучения, приведенные в Публикации 68 МКРЗ для стандартной модели МКРЗ [7] и Публикации 141 для OIR-модели [12, 14]. Значения дозовых коэффициентов рассчитываются с использованием разработанных для целей дозиметрии внутреннего облучения и рекомендованных МКРЗ биокинетических и дозиметрических моделей органов дыхания, желудочно-кишечного тракта, костной

ткани и биокинетики химических элементов в организме условного человека. При расчете дозовых коэффициентов также используются значения коэффициентов качества ионизирующего излучения и взвешивающих коэффициентов для тканей и органов.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются 2 класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД);
- допустимые уровни монофакторного воздействия, являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые допустимые удельные активности (ДУА) и др.<sup>1</sup> Предел годового поступления – уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы<sup>3</sup>. Для персонала категории А устанавливается ПД в 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год<sup>1</sup>. В НРБ-99/2009 значения дозовых коэффициентов, а также величин ПГП рассчитаны для аэрозолей с логарифмически нормальным распределением частиц по активности при медианном по активности аэродинамическом диаметре 1 мкм и стандартном геометрическом отклонении, равном 2,5. Соответствующие пределы годового поступления на основании стандартной модели МКРЗ, установленные в настоящее время НРБ-99/2009 и рассчитанные для OIR-модели, представлены в таблице 2.

Согласно требованиям НРБ-99/2009, для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения, в том числе поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала<sup>1</sup>. Для персонала группы Б основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни воздействия, устанавливаются равными 1/4 значений, введенных для персонала группы А. Рекомендованный максимальный период между измерениями активности соединений <sup>239</sup>Pu в моче и кале при проведении текущего ИДК составляет 180 суток<sup>2</sup>. В таблице 3 приведены значения измеряемых величин при проведении текущего дозиметрического контроля, соответствующие значению ОЭД, равному 20 мЗв (1 ПГП), равному 5 мЗв (1/4 ПГП) и равному 1 мЗв (1/20 ПГП).

В практике аппаратно-методического обеспечения ИДК внутреннего облучения, обусловленного поступлением актинидов, широкое применение находит альфа-спектрометрический метод измерения. Альфа-спектрометрия используется для определения <sup>238</sup>Pu и <sup>239+240</sup>Pu. Из-за близких энергий альфа-частиц <sup>239</sup>Pu и <sup>240</sup>Pu альфа-спектрометры не способны разрешить эти пики, и измеряется сумма изотопов. Порог измерения ( $L_c$ ) альфа-спектрометрического метода измерения составляет 0,7 мБк в СКМ<sup>5</sup>. В последние годы вследствие достигнутого высокого уровня радиационной безопасности в контролируемых условиях использование альфа-спектрометрического метода не всегда удовлет-

Значения дозовых коэффициентов для соединений <sup>239</sup>Pu, Зв/Бк

Таблица 1

[Table 1

Values of dose coefficients for <sup>239</sup>Pu compounds, Sv/Bq]

Тип химического соединения при ингаляции [Type of a chemical compound inhaled]	Стандартная модель МКРЗ [Standard ICRP model] [7]		OIR-модели [OIR models] [12, 14]	
	1 мкм [1 μm]	5 мкм [5 μm]	1 мкм [1 μm]	5 мкм [5 μm]
Тип П [type M]	4,7×10 <sup>-5</sup>	3,2×10 <sup>-5</sup>	2,5×10 <sup>-5</sup>	1,4×10 <sup>-5</sup>
Тип М [type S]	1,5×10 <sup>-5</sup>	8,3×10 <sup>-6</sup>	3,1×10 <sup>-5</sup>	1,7×10 <sup>-5</sup>

Предел годового поступления (ПГП) соединений <sup>239</sup>Pu, Бк

Таблица 2

[Table 2

Annual limit of intake (ALI) of <sup>239</sup>Pu compounds, Bq]

Тип химического соединения при ингаляции [Type of a chemical compound inhaled]	Стандартная модель МКРЗ [Standard ICRP model] [7]		OIR-модели [OIR models] [12, 14]	
	1 мкм [1 μm]	5 мкм [5 μm]	1 мкм [1 μm]	5 мкм [5 μm]
Тип П [type M]	4,3×10 <sup>2</sup> (7,8×10 <sup>1*</sup> )	6,3×10 <sup>2</sup>	8,0×10 <sup>2</sup>	1,4×10 <sup>3</sup>
Тип М [type S]	1,3×10 <sup>3</sup>	2,4×10 <sup>3</sup>	6,5×10 <sup>2</sup>	1,2×10 <sup>3</sup>

\* В НРБ-99/2009 сохранены значения ПГП, приведенные в НРБ-76/87, в связи с достигнутым уровнем безопасности на предприятиях России. Эти значения ниже, чем значения, полученные с использованием дозовых коэффициентов [\* RSS-99/2009 maintains the ALI values provided in RSS-76/87 due to the safety level achieved at the facilities in Russia. These values are lower than those obtained using the dose coefficients].

<sup>5</sup> МВИ. Методика выполнения измерений изотопов плутония, америция, урана и тория в биосубстратах на спектрометре альфа-излучения системы EG&G ORTEC OCTETE PC. Свидетельство № 40090.5H304 от 18.05.2005 г., выдано ФГУП ВНИИФТРИ. Озерск, 2006. 24 с. [Methodology for measurement of plutonium, americium, uranium and thorium isotopes in biosubstrates using EG&G ORTEC OCTETE PC alpha-radiation spectrometer. Certificate No.40090.5H304 of 18 May 2005, issued by FSUE VNIIFTRI (The Federal State Unitary Enterprise «Russian metrological institute of technical physics and radio engineering»). Ozersk, 2006. 24 p. (In Russ.)].

Таблица 3

Значения измеряемых величин при проведении текущего дозиметрического контроля, соответствующие значению ОЭД, равному 20 мЗв, 5 мЗв и 1 мЗв при АМАД 1 мкм при максимальном периоде между измерениями активности 180 суток

[Table 3]

Values measured during a routine dosimetry monitoring corresponding to CED of 20 mSv, 5mSv and 1 mSv for 1 µm AMAD with the maximum period of 180 days between measurements of activity]

Тип химического соединения при ингаляции [Type of a chemical compound inhaled]	Стандартная модель МКРЗ [Standard ICRP model] [7]		OIR-модели [OIR models] [12, 14]	
	Активность в суточном количестве мочи, Бк [Activity in daily urine, Bq]	Активность в суточном количестве кала, Бк [Activity in daily feces, Bq]	Активность в суточном количестве мочи, Бк [Activity in daily urine, Bq]	Активность в суточном количестве кала, Бк [Activity in daily feces, Bq]
<i>Соответствующие ОЭД 20 мЗв [Corresponding to CED of 20 mSv]</i>				
Тип П [type M]	3,6×10 <sup>-3</sup> (6,6×10 <sup>-4*</sup> )	1,4×10 <sup>-2</sup> (2,5×10 <sup>-3*</sup> )	6,5×10 <sup>-3</sup>	3,8×10 <sup>-2</sup>
Тип М [type S]	3,9×10 <sup>-4</sup>	9,9×10 <sup>-2</sup>	2,5×10 <sup>-4</sup>	8,0×10 <sup>-2</sup>
<i>Соответствующие ОЭД 5 мЗв [Corresponding to CED of 5 mSv]</i>				
Тип П [type M]	9,0×10 <sup>-4</sup> (1,6×10 <sup>-4*</sup> )	3,5×10 <sup>-3</sup> (6,4×10 <sup>-4*</sup> )	1,6×10 <sup>-3</sup>	9,4×10 <sup>-3</sup>
Тип М [type S]	9,8×10 <sup>-5</sup>	2,5×10 <sup>-2</sup>	6,2×10 <sup>-5</sup>	2,0×10 <sup>-2</sup>
<i>Соответствующие ОЭД 1 мЗв [Corresponding to CED of 1 mSv]</i>				
Тип П [type M]	1,8×10 <sup>-4</sup> (3,3×10 <sup>-5*</sup> )	7,0×10 <sup>-4</sup> (1,3×10 <sup>-4*</sup> )	3,3×10 <sup>-4</sup>	1,9×10 <sup>-3</sup>
Тип М [type S]	2,0×10 <sup>-5</sup>	4,9×10 <sup>-3</sup>	1,2×10 <sup>-5</sup>	4,0×10 <sup>-3</sup>

\* Согласно установленным НРБ-99/2009 значениям ПГП [\*according to the ALI values established by RSS-99/2009].

воряет требованиям контроля внутреннего облучения от плутония. Большой потенциал в качестве более чувствительного метода измерений активности плутония в биосубстратах имеет новый метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Методом ИСП-МС (ICP-MS) достигается порог измерения 0,1 и 0,2 мБк в СКМ для изотопов <sup>239</sup>Pu и <sup>240</sup>Pu соответственно<sup>6</sup>. В общем случае метод ИСП-МС обладает преимуществом перед альфа-спектрометрией для изотопов <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu и <sup>242</sup>Pu. Тем не менее, вследствие присутствия на многих радиационно-опасных производствах <sup>238</sup>Pu (а также <sup>241</sup>Am) при проведении ИДК целесообразно комбинировать методы альфа-спектрометрии и ИСП-МС.

На рисунках 5 и 6 представлена динамика выведения <sup>239</sup>Pu с мочой при поступлении 1 ПГП соединений типа П (а) и типа М (б) с АМАД 1 мкм (рис. 5) и АМАД 5 мкм (рис. 6) в сравнении с порогом измерения двух методов измерения – альфа-спектрометрического (α-spectrometry) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS).

Как видно на рисунках 5 и 6, при введении новых подходов МКРЗ для соединений типа П поступление 1 ПГП плутония может быть определено в течение года после

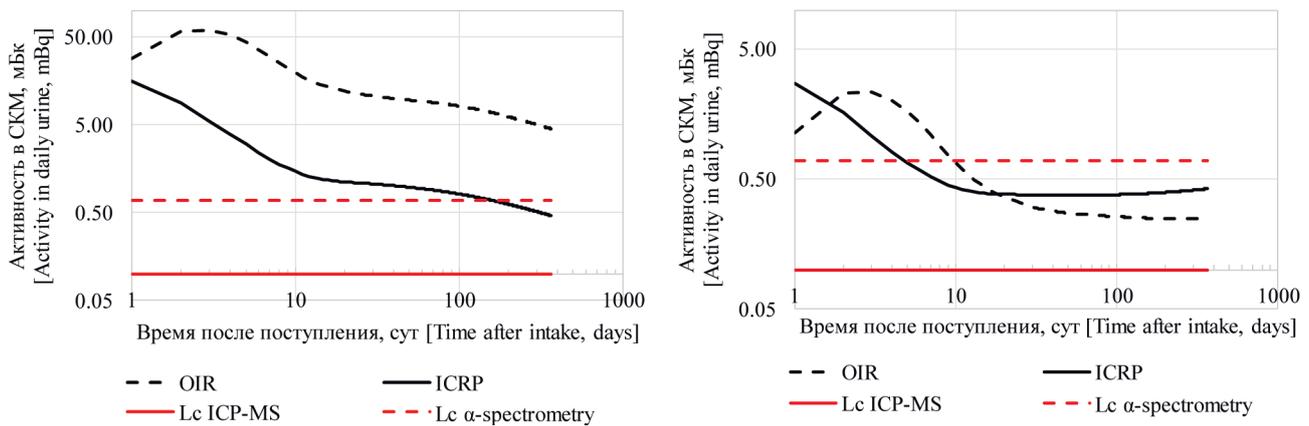
поступления методом альфа-спектрометрии. Метод альфа-спектрометрии позволяет измерить активность в СКМ от поступления 1/4 ПГП при периоде контроля 180 сут, для определения поступления в 1/20 ПГП при рекомендуемом интервале между измерениями 180 сут необходимо использовать метод ИСП-МС.

Для персонала, работающего с труднорастворимыми соединениями плутония, определение поступления 1 ПГП при рекомендуемом интервале между измерениями 180 сут возможно только более чувствительным методом ИСП-МС.

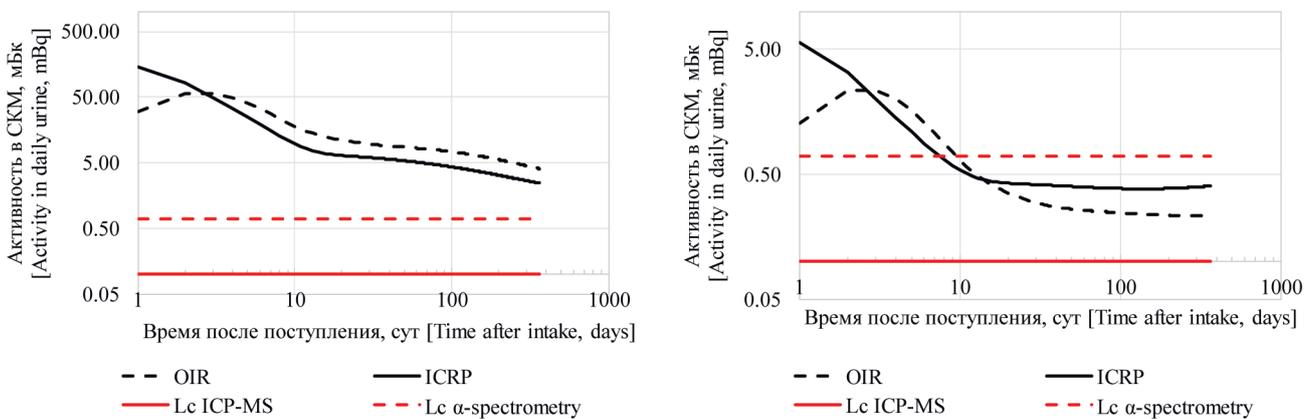
### Заключение

В случае внедрения в практику требований Публикации 130 МКРЗ без учета достигнутых уровней безопасности на предприятиях России (в НРБ-99/2009 для соединений с АМАД 1 мкм сохранены значения ПГП ниже, чем значения, полученные с использованием дозовых коэффициентов), предел годового поступления <sup>239</sup>Pu для соединений типа П с АМАД 1 мкм увеличится на порядок. Для соединений типа М с АМАД 1 мкм и 5 мкм предел годового поступления <sup>239</sup>Pu уменьшится в 2 раза.

<sup>6</sup> СП-21-3-2021. Методика измерений плутония-239, 240 и изотопов урана-235, 238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Свидетельство о метрологической аттестации № СП-21-3-РА.RU.311952-2021, выдано ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.А. Забабахина. [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.)].



**Рис. 5.** Активность в суточном количестве мочи (СКМ) при поступлении 1 ПГП  $^{239}\text{Pu}$  соединений типа П (а) и типа М (б) АМАД 1 мкм  
**[Fig. 5.** Activity in daily urine at intake of 1 ALL of Type M (a) and Type S (b)  $^{239}\text{Pu}$  with AMAD of 1  $\mu\text{m}$ ]



**Рис. 6.** Активность в суточном количестве мочи (СКМ) при поступлении 1 ПГП  $^{239}\text{Pu}$  соединений типа П (а) и типа М (б) АМАД 5 мкм  
**[Fig. 6.** Activity in daily urine at intake of 1 ALL of Type M (a) and Type S (b)  $^{239}\text{Pu}$  with AMAD of 5  $\mu\text{m}$ ]

При введении новых требований Международной комиссии по радиологической защите для соединений плутония типа П поступление более 1/4 ПГП может быть определено в течение года после поступления методом альфа-спектрометрии. Для определения поступления в 1/20 ПГП при рекомендуемом интервале между измерениями 180 суток необходимо использовать метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой или другой метод измерения, обеспечивающий необходимый порог обнаружения. Для персонала, работающего с труднорастворимыми соединениями плутония, определение поступления 1 ПГП и 1/4 ПГП возможно методом масс-спектрометрии, а 1/20 ПГП только еще более чувствительным методом.

#### Личный вклад авторов

А.Б. Соколова осуществляла общее руководство выполнением работы, проанализировала данные, написала черновик рукописи и представила окончательный вариант в редакцию журнала.

А.В. Ефимов выполнил анализ литературных данных, отредактировал промежуточный вариант статьи.

А.Б. Джунушалиев выполнил сравнительный анализ функций удержания и выведения, отредактировал промежуточный вариант статьи.

#### Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за тщательный анализ статьи.

#### Конфликт интересов

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

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Российской Федерации «Совершенствование методов контроля и изучение особенностей формирования доз внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк» и

населения прилегающих территорий» код-11.001.22.800  
шифр «Луч-22», финансируемого ФМБА России.

### Литература

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2–4).
2. ICRP, 1979a. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Ann. ICRP 2(3/4).
3. ICRP, 1979b. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Supplement to Part 1. Ann. ICRP 3(1–4).
4. ICRP, 1980. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2. Ann. ICRP 4(3/4).
5. ICRP, 1994a. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1–3).
6. ICRP, 1993. 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).
7. ICRP, 1994b. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
8. ICRP, 1997. Individual monitoring for internal exposure of workers – replacement of ICRP Publication 54. ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27(3/4).
9. ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).
10. ICRP, 2016. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP 45(3/4).
11. ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
12. ICRP, 2019. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP 48(2/3).
13. ICRP, 2006. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
14. ICRP, 2019. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP 48(2/3). Supplemental Material. OIR Data Viewer for P134, P137 and P141. v4010419. 2019 July 30. [https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB\\_48\\_2-3](https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_48_2-3). (Дата обращения: 10.08.2022)

Поступила: 12.05.2022 г.

**Соколова Александра Борисовна** – научный сотрудник Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства. **Адрес для переписки:** 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: sokolova@subi.su

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 Южно-Уральского института биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

**Для цитирования:** Соколова А.Б., Ефимов А.В., Джунушалиев А.Б. Анализ соответствия действующей системы индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, актуальным рекомендациям МКРЗ // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 3. С. 50-57. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-50-57

## Analysis of correspondence between the current individual monitoring system of internal exposure caused by plutonium intake and the relevant ICRP recommendations

Alexandra B. Sokolova, Alexander V. Efimov, Artem B. Dzhunushaliev

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

*Individual dosimetry monitoring of occupational internal exposure due to plutonium intake is performed by the bioassay method which measures the plutonium isotopes in daily urine samples. Then, to estimate normalized values (committed effective dose and intake), biokinetic and dosimetry models are used. The currently valid major instruments of radiation safety in the Russian Federation are based on the requirements and approaches outlined in Publications 68 and 78 of the International Commission on Radiobiological Protection. In implementing the requirements of Publication 130 there will be a need for updating the Russian*

**Alexandra B. Sokolova**

Southern Urals Biophysics Institute

**Address for correspondence:** Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: sokolova@subi.su

guidance documents to the new requirements. The purpose of this study was the analysis of correspondence of the current system of individual monitoring of internal exposure caused by plutonium intake to the relevant recommendations of the International Commission on Radiobiological Protection outlined in Publication 130 by the example of the FSUE "Mayak PA" production conditions. As a result of the study, the values of annual limit of plutonium intake were determined based on new biokinetic and dosimetry models, and the measured values were calculated during the current dosimetry monitoring corresponding to the value of committed effective dose limit for Category A, B personnel and women under 45 years of age. It was found that following the introduction of new requirements of the International Commission on Radiobiological Protection for Type M compounds, an intake of more than 1/4 of annual limit of plutonium intake could be determined within a year after intake using the method of alpha spectrometry. To determine an intake of 1/20 of annual limit of intake at the recommended interval of 180 days between measurements, it is necessary to use inductively-coupled plasma mass spectrometry. For the personnel working with insoluble compounds of plutonium, an intake of one annual limit of intake and 1/4 of annual limit of intake can be determined using mass spectrometry, and 1/20 of annual limit of intake can be determined using only a more sensitive method.

**Key words:** plutonium, internal exposure, individual monitoring, bioassay.

### Personal participation of authors

A.B. Sokolova provided general management of the project, analyzed the data, wrote a draft of the manuscript and arranged the final version of the manuscript for publication in the journal.

A.V. Efimov analyzed of the literature data, edited the intermediate version of the manuscript.

A.B. Dzhunushaliev carried out a comparative analysis of the retention and excretion functions, edited the intermediate version of the manuscript.

### Acknowledgment

The authors would like to thank the reviewers for their thorough analysis of the article.

### Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in the conducting of the work and preparation of this article.

### Funding

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Russian Federation "Improving methods of control and studying the features of the formation of internal doses for the personnel of "PA Mayak" and the population of adjacent territories" code-11.001.22.800 code "Luch-22", funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

### References

1. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37(2-4).
2. ICRP, 1979a. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 1. Ann. ICRP 2(3/4).
3. ICRP, 1979b. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Supplement to Part 1. Ann. ICRP 3(1-4).
4. ICRP, 1980. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30, Part 2. Ann. ICRP 4(3/4).
5. ICRP, 1994a. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3).
6. ICRP, 1993. 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).
7. ICRP, 1994b. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24(4).
8. ICRP, 1997. Individual monitoring for internal exposure of workers – replacement of ICRP Publication 54. ICRP Publication 78. Ann. ICRP 27(3/4).
9. ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2).
10. ICRP, 2016. Occupational intakes of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP 45(3/4).
11. ICRP, 2017. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
12. ICRP, 2019. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP 48(2/3).
13. ICRP, 2006. Human alimentary tract model for radiological protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1/2).
14. ICRP, 2019. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP 48(2/3). Supplemental Material. OIR Data Viewer for P134, P137 and P141. v4010419. 2019 July 30. [https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB\\_48\\_2-3](https://journals.sagepub.com/doi/suppl/10.1177/ANIB_48_2-3). (Accessed: August 10, 2022).

Received: May 12, 2022

**For correspondence: Alexandra B. Sokolova** – Researcher, Southern Urals Biophysics Institute of the Federal Medical Biological Agency (Ozerskoe shosse, 19, Ozersk, 456780, Chelyabinsk oblast, Russia; E-mail: sokolova@subi.su  
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

**For citation: Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliev A.B. Analysis of correspondence between the current individual monitoring system of internal exposure caused by plutonium intake and the relevant ICRP recommendations. Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 50-57. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-3-50-57**