

В.В. Востротин

ИНТЕГРАЦИЯ МОДЕЛЕЙ OIR МКРЗ В ДОЗИМЕТРИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ iDose 2

Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск

Контактное лицо: Вадим Владимирович Востротин, e-mail: vostrotin@subi.su

РЕФЕРАТ

Введение: Дозиметрическая система iDose 2 является инструментом по оценке доз внутреннего облучения персонала при текущем индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК). В данной системе по серии измерений активности радионуклидов в биологических объектах (в том числе не превышающих предел обнаружения методики измерения) и информации о временах контактов и типах соединений производятся оценки ожидаемых эффективных доз (ОЭД) внутреннего облучения, а также их неопределённостей на основе байесовского подхода. В дозиметрическую систему iDose 2 возможно без изменения исходного кода интегрировать практически любые биокинетические модели поведения радионуклидов в организме человека, представленных в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с постоянными коэффициентами перехода между компартментами.

Цель: Интеграция новых комбинированных биокинетических моделей для списка радионуклидов: H-3, Sr-90, Cs-137, Pu-238, Pu-239 и Am-241 из Публикаций 100, 130, 134, 137 и 141 МКРЗ (условно названных серией Occupational Intakes of Radionuclides (OIR)), для перорального и ингаляционного путей поступления при АМАД=1 и 5 мкм.

Материал и методы: Для каждого варианта биокинетической модели функции удержания/выведения радионуклидов находились через собственные вектора и собственные числа матрицы, описывающей систему ОДУ.

Результаты: Всего было интегрировано 65 новых биокинетических моделей и 180 функций удержания/выведения радионуклидов в виде суммы экспонент и проведён контроль качества.

Ключевые слова: внутреннее облучение, биокинетическая модель, индивидуальный дозиметрический контроль, поступление радионуклидов, Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ), дозиметрическая система iDose 2, интеграция моделей

Для цитирования: Востротин В.В. Интеграция моделей OIR МКРЗ в дозиметрическую систему iDose 2 // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 5. С. 19–27. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-5-19-27

DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-5-19-27

V.V. Vostrotin

Integration of ICRP OIR Models Into the iDose 2 Dosimetry System

Southern Urals Biophysics Institute, Ozyorsk, Russia

Contact person: V.V. Vostrotin, e-mail: vostrotin@subi.su

ABSTRACT

Introduction: The iDose 2 dosimetry system is a tool for assessing the doses of internal irradiation of workers under the current individual dosimetry control (IDC). In this system, according to a series of measurements of the activity of radionuclides in biological objects (including those not exceeding the detection limit of the measurement technique) and information on contact times and types of compounds, estimates of the committed effective dose equivalent (CEDE) of internal irradiation, as well as their uncertainties, are made based on the Bayesian approach. It is possible to integrate practically any biokinetic models of the behavior of radionuclides in the human body, presented in the form of a system of ordinary differential equations (ODEs) with constant transition coefficients between compartments, into the iDose 2 dosimetry system without changing the source code.

Purpose: Integration of new combined biokinetic models for the list of radionuclides: H-3, Sr-90, Cs-137, Pu-238, Pu-239 and Am-241 from Publications 100, 130, 134, 137 and 141 of the ICRP (conventionally called the series Occupational Intakes of Radionuclides (OIR)), for ingestion and inhalation routes of intake with AMAD = 1 and 5 microns.

Material and methods: For each variant of the biokinetic model, the functions of retention/removal of radionuclides were found through the eigenvectors and eigenvalues of the matrix describing the ODE system.

Results: A total of 65 new biokinetic models and 180 functions of radionuclide retention/removal in the form of a sum of exponents were integrated and quality control was carried out.

Keywords: internal exposure, biokinetic model, individual dosimetry control, Occupational Intakes of Radionuclides (OIR), ICRP, dosimetry system iDose 2, integration of models

For citation: Vostrotin VV. Integration of ICRP OIR Models Into the iDose 2 Dosimetry System. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(5):19–27. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-5-19-27

Введение

Методические указания МУ 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования» [1] содержат требования к системе индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения работников, определяющие периодичность измерения активности радиону-

клидов в биологических объектах (моча, кал, лёгкие, всё тело и др.) и способы интерпретации совокупности результатов измерений для последующей оценки ожидаемых эффективных доз (ОЭД). Пункт 58 МУ 2.6.1.065-2014 требует, чтобы все расчеты индивидуальных доз выполнялись для математической модели стандартного работника, включающей модели Международной ко-

миссии по радиационной защите (МКРЗ), использованные при разработке Норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009)[2], и предназначеннной для обеспечения стандартизованной основы для определения индивидуальной дозы профессионального внутреннего облучения. При подготовке НРБ-99/2009 в части расчётов дозовых коэффициентов перехода от величины поступления к ОЭД для работников использовался целый ряд Публикаций №№ 30 (части 1–4), 54, 66, 67 и 68 МКРЗ [3–10], содержащих описания биокинетических моделей поведения радионуклидов в организме человека при ингаляционном или пероральном поступлении.

В ЮУрИБФ в течение 2013–2015 гг. были разработаны и в 2016 году утверждены на уровне ФМБА Методические указания по методам контроля МУК 2.6.5.045-2016 «Указания по методам контроля (мук) для определения доз внутреннего облучения персонала при стандартных и специальных условиях. Методика выполнения расчётов» [11]. Была разработана специальная компьютерная программа iDose 2 [12–14], являющаяся де-факто дозиметрической системой оценки внутреннего облучения работников при текущем ИДК. Дозиметрическая система iDose 2 позволяла вести базу данных результатов измерений, проводить их интерпретацию и хранить результаты расчётов ОЭД и их неопределённостей, а также содержала базу данных коэффициентов экспоненциальных функций для перехода от величины поступления к доле активности в различных биологических объектах и связанных с выбранной биокинетической моделью дозовых коэффициентах (ДК), выраженных в Зв/Бк. Это позволило расширять возможности дозиметрической системы iDose 2, не внося изменений в её исходный код. На способ оценки ОЭД был получен патент Российской Федерации RU 2650075 С2 [15]. Данные оценки могли проводиться с включением в анализ «недостоверных» результатов, т.е. не превышающих предел обнаружения

активности методики измерения, для следующих радионуклидов: Н-3, Pu-238, Pu-239, Am-241. Историческое сравнение возможностей дозиметрической системы iDose 2 с аналогичной дозиметрической системой на основе компьютерных программ семейства ММК [16, 17] представлено в статье [12].

В 2018 г. для Pu-239 был расширен спектр возможных размеров частиц от 0,001 до 10 мкм, выраженных через активностный медианный термодинамический или аэродинамический диаметры (АМТД или АМАД) [18]. В 2019 г. в изначальный список радионуклидов были добавлены Sr-90 и Cs-137 [19]. В 2020 г. была добавлена возможность оценки не только ОЭД, а также величин поступлений, отнесённых в течение календарного года к разным путям и/или типам соединений [20]. Полный перечень радионуклидов, связанных с ним моделей, типов соединений и размеров частиц, а также измеряемых биологических объектах, заложенных в дозиметрическую систему iDose 2 на конец 2021 г. представлен в табл. 1.

В 2015 г. МКРЗ выпустила Публикацию №130 [21], регламентирующую новый порядок оценок ингаляционного и перорального поступления радионуклидов в организм работников и ОЭД внутреннего облучения. В данной публикации содержатся требования к использованию новой модели пищеварительного тракта из Публикации № 100 МКРЗ [22], а также новых взвешивающий тканевых коэффициентов из Публикации №103 МКРЗ [23]. Основная часть Публикации №130 посвящена пересмотру модели дыхательного тракта из Публикации № 66 МКРЗ [8]. В период с 2016 по 2019 гг. МКРЗ выпустила Публикации №№134, 137 и 141 [24–26], содержащие параметры абсорбции в кровь из пищеварительного тракта при пероральном поступлении, параметры абсорбции из дыхательного тракта при ингаляционном поступлении, параметры биокинетиче-

Таблица 1

Полный перечень радионуклидов, связанных с ним моделей, типов соединений и размеров частиц, заложенных в дозиметрическую систему iDose 2 (на конец 2021 г.)

A complete list of radionuclides, associated models,

types of compounds and particle sizes embedded in the iDose 2 dosimetry system (as of the end of 2021)

Радионуклид	Путь поступления	Тип соединения при ингаляции	Химическое соединение	АМТД/АМАД, мкм	ДК, Зв/Бк	Коды биологических объектов*
Н-3	Ингаляционный	Газ (Г2)	НТ	–	1,8E-15	U, W
		Пар (Г1)	НТО		1,8E-11	
	Пероральный/Перкутанный	–	НТО	–	1,8E-11	U, W
Sr-90	Ингаляционный	Быстрые (Б)	–	1	2,4E-8	U, F
		Медленные (М)	–	1	1,5E-7	
	Пероральный	–	–	–	2,8E-8	
Cs-137	Ингаляционный	Б	–	1	4,8E-9	B
	Пероральный	–	–	–	1,4E-8	
Pu-238	Ингаляционный	Промежуточные (П)	Нитрат	1	4,3E-5	U, F
		М	Оксид	1	1,5E-5	
Pu-239	Ингаляционный	П	Нитрат	1	4,7E-5	U, F
		М	Оксид	1	1,5E-5	
		20 % П + 80 % М	Смесь в разной пропорции	1	2,14E-5	
		50 % П + 50 % М		1	3,10E-5	
		80 % П + 20 % М		1	4,03E-5	
Pu-239	Ингаляционный	П	Нитрат	От 0,001 до 10	От 2,0E-5 до 2,1E-4	U, F
		М	Оксид	От 0,001 до 10	От 5,9E-6 до 7,4E-5	
Am-241	Ингаляционный	П	–	1	3,9E-5	L, V, S

Примечание: * U – моча, W – конденсат паров выдыхаемого воздуха, F – кал, В – всё тело, L – лёгкие, V – печень, S – скелет

ских моделей системного пула¹ и дозовые коэффициенты для широкого спектра радионуклидов и их соединений. Перечень соединений был расширен в сравнении с предыдущей классификацией, заложенной в Публикациях №№ 66 и 68 МКРЗ. В Публикациях №№ 134, 137 и 141 в таблицах содержатся численные расчёты ОЭД, выраженные в Зв, полученные от единичных активностей радионуклидов в биологических пробах в период от 1 до 365 сут при однократном пероральном и ингаляционном поступлении. Данные табличные расчёты могли быть использованы как для быстрой оценки ОЭД по единичному результату измерения активности радионуклида в биологическом объекте, так и для контроля качества собственных расчётов функций выведения и удержания по сложным биокинетическим моделям поведения радионуклида в организме человека. Публикации №№ 130, 134, 137 и 141 были условно названы МКРЗ серией Occupational Intakes of Radionuclides (OIR).

Целью данной работы являлась представление основных результатов интеграции новых комбинированных биокинетических моделей для списка радионуклидов: Н-3, Sr-90, Cs-137, Pu-238, Pu-239 и Am-241, представленных в Публикациях 100, 130, 134 и 141 МКРЗ, для перорального и ингаляционного путей поступления (при АМАД=1 и 5 мкм) в дозиметрическую систему iDose 2. Детальное описание методов и полученных результатов представлено в разделе 8 промежуточного отчёта НИР «Совершенствование методов контроля и изучение особенностей формирования доз внутреннего облучения персонала ПО «Маяк и населения прилегающих территорий», шифр «Луч-22»[27].

Материал и методы

Структура общей биокинетической модели транспорта радионуклидов в организме человека, заимствованная из Публикации №130 МКРЗ, представлена на рис. 1.

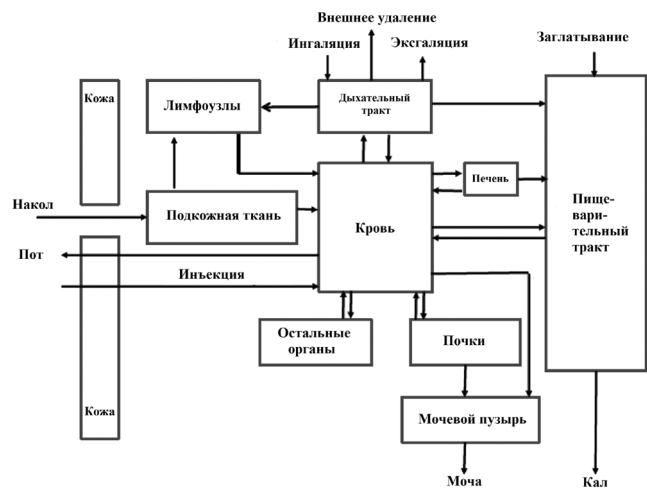


Рис. 1. Структура общей биокинетической модели поведения активности радионуклидов в организме человека, заимствованная из Публикации № 130 МКРЗ.

Fig. 1. The structure of the general biokinetic behavior model of radionuclide activity in the human body taken from ICRP Publication 130

Общая биокинетическая модель поведения активности в организме является универсальной. На практике, в зависимости от пути поступления, использовались раз-

¹ Под системным пулом подразумевался набор органов человека за исключением органов дыхательного тракта. С этой точки зрения пищеварительный тракт входит в состав системного пула.

личные комбинированные биокинетические модели, состоящие из нескольких частей. При пероральном поступлении радионуклида комбинированная модель состояла из двух частей: модели системного пула и включённой в её состав модели пищеварительного тракта из Публикации № 100 МКРЗ. При ингаляционном поступлении радионуклида в комбинированную модель добавлялась третья часть – модель дыхательного тракта из Публикаций №№ 66 и 130 МКРЗ. Организм человека в биокинетической модели был представлен в виде набора органов и их содержимого. Каждый орган человека и его содержимое были представлены в виде одного или нескольких компартментов в зависимости от уровня необходимой детализации. Модели пищеварительного и дыхательного трактов являлись общими для всех радионуклидов.

Параметр f_A в модели пищеварительного тракта, определяющий долю всасывания активности из тонкой кишки в кровь, зависел от радионуклида и типа его соединения. Численные значения параметра f_A приведены в Публикациях №№ 134, 137 и 141 МКРЗ. Следует отметить, что в случае $f_A = 1$ скорость всасывания из тонкой кишки в кровь будет равна бесконечности. Чтобы обойти возможные трудности при расчётах, МКРЗ в собственной компьютерной программе OIR_2022 Data Viewer² использовала вместо единицы значение $f_A = 0,99$. При интеграции моделей в дозиметрическую систему iDose 2, за исключением Cs-137, использовался более близкий к единице коэффициент $f_A = 0,9999$.

Поступление радионуклидов в дыхательный тракт человека может происходить в виде аэрозольных частиц, газа или пара. Согласно модели дыхательного тракта, с аэрозольными частицами происходят три основных процесса: первоначальное отложение в различных отделах; механический клиренс внутри отделов дыхательного тракта с последующим заглатыванием в пищеварительный тракт; абсорбция из отделов дыхательного тракта в кровь с последующим перераспределением между органами системного пула. При поступлении радионуклида в виде газа или пара мукозилярный клиренс отсутствует.

В случае ингаляционного поступления аэрозольных частиц использовался первый вариант абсорбции активности из дыхательного тракта в кровь, связанный с моделированием быстрой с долей f_r и медленной фазы с долей $1-f_r$, и, в случае необходимости, моделированием связывания частиц в отделах со скоростью s_b . Параметры абсорбции из дыхательного тракта в кровь не зависят от размеров частиц, поэтому могут быть использованы как для АМАД=1 мкм, так и АМАД=5 мкм.

Для достижения цели, поставленной во введении, использовался изначально разработанный в рамках НИР «Импульс-13» [28] подход, заключающийся в численном методе решения любой построенной комбинированной биокинетической модели поведения радионуклида в организме человека, представленной в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) первого порядка с постоянными коэффициентами при заданном начальном условии:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = A \times \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(0) \end{cases} \quad (1)$$

где t – время, прошедшее с момента однократного поступления в организм человека, сут; $\dot{\mathbf{x}}(t)$ – вектор производных по времени активностей радионуклида в компартментах организма, выраженных в Бк/сут; A – фик-

² Компьютерная программа находилась в составе сопроводительных материалов <https://www.icrp.org/docs/ICRP 2022 OIR Electronic Annex Distribution Set.zip> (проверено 22.09.2022, размер архива ~100 Мб).

сированная квадратная матрица, определяющая систему ОДУ, размерностью $N \times N$, содержащая постоянные скорости перемещения между компартментами и постоянные скорости радиоактивного распада в них, выраженные в сут $^{-1}$; N – число компартментов в организме человека для выбранной комбинированной математической модели; $x(t)$ – вектор активностей радионуклида, выраженных в Бк, в различных компартментах организма в момент времени t .

Для каждой комбинированной биокинетической модели составлялась матрица скоростей переходов между компартментами, которая затем преобразовывалась в необходимую матрицу A путём суммирования скоростей переходов из компартментов и добавления этих сумм в диагональные элементы со знаком минус. На завершающем шаге преобразования матрицы в диагональные элементы со знаком минус добавлялись скорости радиоактивного распада для выбранного радионуклида. Постоянныес скорости распада радионуклидов и характеристики излучения были взяты из онлайн базы данных МАГАТЭ Live Chart Of Nuclides³.

Рассматривался случай однократного поступления активности 1 Бк, которая могла находиться как в одном компартменте, например – в содержимом полости рта при пероральном поступлении или в крови при ингаляционном поступлении в виде пара или газа, так и частично отложиться в нескольких компартментах (носоглотка, бронхи, бронхиолы и альвеолярно-интерстициальный отдел) при ингаляционном поступлении в виде аэрозольных частиц.

Решение системы (1) искалось для i -го компартмента численно в виде суммы экспонент вида:

$$x_i = \sum_{k=1}^N a_{k,i} \times \exp(b_k t), i = 1 \dots N \quad (2)$$

где $a_{k,i}$ – коэффициенты, пропорциональные собственным векторам транспонированной матрицы A^T . Значения данных коэффициентов пропорциональности зависело от вектора начальных условий x_0 и находилось через решение системы линейных алгебраических уравнений размерностью N . b_k – собственные значения транспонированной матрицы A^T , выраженные в сут $^{-1}$.

В дальнейшем коэффициенты $a_{k,i}$ для функции удержания суммировались по соответствующим компартментам $a_k = \sum_i a_{k,i}$ и приводились к долям делением на 1 Бк поступившей активности радионуклидов, а для трития – к долевой объёмной активности делением на 1 Бк поступившей активности и дополнительным делением на суточный объём биологического объекта (Публикация №89 МКРЗ, стандартный мужчина, суточный объём мочи равен 1,6 л [29]). Для функции выведения коэффициенты $a_{k,i}$ умножались на скорость выведения из соответствующего i -го компартмента в компартмент экскретов: из содержимого мочевого пузыря в мочу или из содержимого сигмовидной и прямой кишки в кал.

Для поиска значений a_k и b_k были написаны исходные коды в виде скриптов в программе R версии 4.0.2 (Taking Off Again). На завершающем этапе, для ускорения расчётов ОЭД, из совокупности полученных коэффициентов были исключены пары, не вносящие значимый вклад в итоговую функцию удержания или выведения. При этом погрешность редуцированных функций не превышала 0,1 % относительно исходных на промежутке времени от 1 до 18250 сут.

³ <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (проверено 17.10.2022).

Результаты и обсуждение

Интеграция моделей OIR для Н-3

Радионуклид является чистым бета-излучателем со средней энергией 5,7 кэВ. Период полураспада Н-3 составляет 12,32 лет, скорость распада равна 1,540E-4 сут $^{-1}$. После распада Н-3 превращается в стабильный нуклид Не-3. Модели внелёгочного пула для Н-3 при поступлении в форме НТО и органически связанных трития (ОСТ), а также численные значения скоростей перехода между компартментами, представлены в публикации № 134 МКРЗ.

ИДК внутреннего облучения тритием на практике основан на измерениях объемной активности (ОА) Н-3 в разовой пробе мочи или в конденсате паров выдыхаемого воздуха, выраженных в Бк/л. Ранее в дозиметрической системе iDose 2 с этой целью для Н-3 использовалась функция удержания активности радионуклида во всём теле, отнесённая к стандартному объёму воды в организме 42 л из Публикации № 23 МКРЗ [30]. При этом предполагалось, что ОА Н-3 в воде организма и в моче равны, а ОА в парах выдыхаемого воздуха на 10 % меньше. Для оценки ОА, выводимой с мочой, выраженной в Бк/л, по моделям из Публикации №134 МКРЗ, необходимо умножить активность радионуклида в крови $A_{blood}(t)$, выраженную в Бк, на скорость выведения 0,7 сут $^{-1}$, а также умножить на долю 0,55, переходящую в содержимое мочевого пузыря и разделить на объём суточного количества мочи (СКМ), отнесённый к одним суткам. Для стандартного мужчины ОА Н-3, выводимая с мочой будет равна:

$$OA_{urine}(t) = A_{blood}(t) \times \frac{0,7 \text{ сут}^{-1} \times 0,55}{1,6 \text{ л/сут}}, \text{ Бк/л} \quad (3)$$

где 1,6 л/сут – объём СКМ стандартного мужчины, согласно Публикации № 89 МКРЗ, делённый на время.

Функция удержания в виде суммы экспонент для относительной ОА Н-3 в моче при однократном поступлении 1 Бк будет совпадать с формулой (3) за исключением размерности, которая будет выражена в л $^{-1}$. Объём воды в конденсате паров стандартного мужчины, выведенной за сутки, равен 0,69 л/2=0,345 л, согласно Публикации № 89 МКРЗ. Вследствие того, что отношения долей в общей экскреции к суточным количествам для мочи и конденсата выдыхаемого воздуха равны с погрешностью ~1 %,

т.е. $\frac{0,55}{1,6} \approx \frac{0,12}{0,345}$, можно приближенно считать, что ОА Н-3 в моче $OA_{urine}(t)$ и конденсате выдыхаемого воздуха $OA_{exh}(t)$ для стандартного мужчины по модели Публикации №134 МКРЗ будут равны:

$$OA_{exh}(t) \approx OA_{urine}(t) \quad (4)$$

Соответственно будут приближённо равны и функции удержания для относительной ОА Н-3 в моче и в конденсате паров выдыхаемого воздуха, выраженные в л $^{-1}$.

Параметры начального отложения в дыхательном тракте при ингаляционном поступлении Н-3 в форме газа или пара (типы V и F) представлены в Публикации № 134 МКРЗ. Для типа соединений V не было необходимости в моделирования поведения активности в дыхательном тракте, следовало учесть только долю первоначального отложения в дыхательном тракте, которая мгновенно переходила в кровь. Для соединения типа F перемещение 80 % активности (отделы ВВ, bb и AI) из дыхательного тракта в кровь происходило со скоростью 100 сут $^{-1}$, что практически также является мгно-

венным. Оставшиеся 20 % активности от отложения в отделе ЕТ₂ распределялись пополам: 10 % со скоростью 100 сут⁻¹ переходило в кровь и 10 % со скоростью также 100 сут⁻¹ переходило в пищевод пищеварительного тракта (со скоростями 90 сут⁻¹ в быструю фазу, 10 сут⁻¹ в медленную фазу). Так как из тонкой кишки происходила полная абсорбция в кровь ($f_A=1$), то 10 % активности в пищеводе переходило в конечном итоге в кровь со скоростью ~20 сут⁻¹. Таким образом на практике для неспецифичных форм газа и пара, отнесённых к типу F, следует использовать ту же биокинетическую модель, что и для тритированной воды (HTO), отнесённой к типу V.

Параметры абсорбции H-3 из дыхательного тракта в кровь для различных типов соединений при ингаляционном поступлении радионуклида в форме аэрозольных частиц и параметры абсорбции H-3 из пищеварительного тракта в кровь при пероральном поступлении, а также дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального путей поступления H-3 в организм работника, были заимствованы из Публикации №134 МКРЗ и компьютерной программы OIR_2022_Data_Viewer. Общее количество компартментов при моделировании поведения соединений H-3 в организме варьировалось от 5 до 36.

Интеграция моделей OIR для Sr-90

Радионуклид является чистым бета-излучателем со средней энергией 0,196 МэВ. Период полураспада Sr-90 составляет $28,91 \pm 0,03$ лет, скорость распада $6,56E-5$ сут⁻¹. Дочерним радионуклидом является Y-90 с периодом полураспада $64,05 \pm 0,03$ ч, скорость распада $2,60E-1$ сут⁻¹. Y-90 является также чистым бета-излучателем со средней энергией 0,932 МэВ. Модель внелёгочного пула для всех изотопов стронция, в том числе для Sr-90, а также скорости перехода между компартментами представлены в публикации №134 МКРЗ.

ИДК внутреннего облучения от Sr-90 и дочернего Y-90 основана на интерпретации серии измерений активности радионуклида в СКМ. В случае измерения ОА Sr-90 в моче, выраженной в Бк/л, её необходимо привести к активности в СКМ умножением на объём суточной мочи стандартного мужчины, равный 1,6 л или на объём суточной мочи стандартной женщины, равный 1,2 л, из Публикации № 89 МКРЗ. Относительная скорость экскреции Sr-90 с мочой при однократном поступлении (функция выведения в виде суммы экспонент) равна активности радионуклида в содержимом мочевого пузыря $A_{UBC}(t)$, делённой на величину поступления I и умноженной на скорость выведения из него:

$$\frac{dA_{\text{urine}}(t)}{dt} \times \frac{1}{I} = \frac{A_{UBC}(t)}{I} \times 12 \text{ сут}^{-1} = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля/сут, (5)}$$

где Z – количество значимых компонент функции выведения.

Для расчёта доли активности Sr-90 в СКМ при однократном поступлении использовалась интегрирующая формула:

$$\frac{A_{CKM}(t)}{I} = \sum_{k=1}^Z a_k \frac{1}{b_k} (e^{b_k t} - e^{b_k(t-1)}), \text{ доля (6)}$$

При расчётах функций выведения Sr-90 с мочой использовались две комбинированные модели: при пероральном поступлении – модель внелёгочного пула, содержащая в себе модель пищеварительного тракта, при ингаляционном поступлении – модель дыхательного

тракта плюс та же самая модель внелёгочного пула, содержащая модель пищеварительного тракта.

Параметры абсорбции Sr-90 из дыхательного тракта в кровь для различных типов соединений при ингаляционном поступлении радионуклида в форме аэрозольных частиц и параметры абсорбции Sr-90 из пищеварительного тракта в кровь при пероральном поступлении, а также дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального путей поступления Sr-90 в организм работника были заимствованы из Публикации №134 МКРЗ и компьютерной программы OIR_2022_Data_Viewer. Общее количество компартментов при моделировании поведения соединений Sr-90 в организме варьировалось от 21 до 43.

Интеграция моделей OIR для Cs-137

Радионуклид является чистым β -излучателем со средней энергией 0,187 МэВ. Период полураспада Cs-137 составляет $30,08 \pm 0,09$ лет, скорость распада $6,31E-5$ сут⁻¹. С вероятностью 94,4 % распадается в метастабильный Ba-137m, имеющий период полураспада 2,55 минуты, характеристическую γ -линию 663 кэВ и превращающийся в стабильный Ba-137. С вероятностью 5,6 % Cs-137 превращается сразу в стабильный Ba-137. Модель внелёгочного пула для всех изотопов цезия, в том числе для Cs-137, а также скорости перехода между компартментами, представлены в Публикации № 137 МКРЗ.

ИДК внутреннего облучения от Cs-137 и дочернего Ba-137m основана на интерпретации серии измерений активности радионуклида в СКМ, лёгких или во всём теле. В практике лаборатории № 3 ЮУрИБФ контроль осуществляется по измерениям активности Cs-137 во всём теле. Доля активности (функция удержания) во всём теле рассчитывалась как сумма активностей во всех компартментах биокинетической модели, за исключением экскретов: мочи, пота и кала, отнесённых к величине поступления I :

$$\frac{A_{WB}(t)}{I} = \frac{1}{I} \left\{ \sum_{i,i \neq \{Urine, Sweat, Feces\}} A_i(t) \right\} = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля (7)}$$

где Z – количество значимых компонент функции удержания во всём теле.

Из всех комбинированных биокинетических моделей рассматривался только случай перорального поступления соединений, отнесённых к хлоридам, нитратам, сульфатам и неспецифическим соединениям с коэффициентом абсорбции из тонкой кишки в плазму крови $f_A=1$ с дозовым коэффициентом $1,4E-8$ Зв/Бк. При расчётах функции удержания во всём теле значение коэффициента незначительно уменьшалось до $f_A=0,99$ для избежания деления на ноль при расчёте скорости перехода из содержимого тонкого кишечника в плазму крови.

Интеграция моделей OIR для Pu-238 и Pu-239

Радионуклиды Pu-238 и Pu-239 являются практически чистыми α -излучателями, с усреднёнными энергиями 5,49 МэВ и 5,15 МэВ соответственно. Период полураспада Pu-238 составляет $87,7 \pm 0,01$ лет, скорость распада $2,16E-5$ сут⁻¹. Период полураспада Pu-239 составляет $24,110 \pm 30$ лет, скорость распада $7,87E-8$ сут⁻¹. Модель внелёгочного пула для всех изотопов плутония, а также скорости перехода между компартментами представлены в Публикации № 141 МКРЗ.

ИДК внутреннего облучения от Pu-238 или Pu-239 основана на интерпретации серии измерений активности радионуклида в СКМ, суточном количестве кала (СКК) или лёгких. Типичное значение предела обнару-

жения активности в лёгких по рентгеновскому излучению, по данным публикации № 141 МКРЗ, составляет 1000 Бк для Pu-238 и 4000 Бк для Pu-239 на современном измерительном оборудовании. Доля активности радионуклидов в СКМ при однократном поступлении в организм может быть вычислена, как и для Sr-90, по формулам (5) и (6). Для СКК использовался аналогичный подход. Относительная скорость экскреции Pu-238 или Pu-239 с калом при однократном поступлении (функция выведения в виде суммы экспонент) равна активности радионуклида в содержимом сигмовидной и прямой кишки $A_{RS}(t)$, делённой на величину поступления I и умноженной на скорость выведения из них:

$$\frac{dA_{feces}(t)}{dt} \times \frac{1}{I} = \frac{A_{RS}(t)}{I} \times 2 \text{ сут}^{-1} = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля/сут} \quad (8)$$

где Z – количество значимых компонент функции выведения с калом.

Для расчёта доли активности Pu-238 или Pu-239 в СКК при однократном поступлении, так же как и для СКМ, необходимо использовать интегрирующую формулу:

$$\frac{A_{CKK}(t)}{I} = \int_{t=1}^t \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t} dt = \sum_{k=1}^Z \frac{a_k}{b_k} (e^{b_k t} - e^{b_k(t-1)}), \text{ доля} \quad (9)$$

Доля активности (функция удержания) в лёгких рассчитывалась как сумма активностей в бронхах, бронхиолах, торакальных (лёгочных) лимфоузлах, альвеолярно-интерстициальном отделе, 9,5E-3 доли⁴ мягких тканей (ST₀+ST₁+ST₂) и в 1/8 доли крови, отнесённых к величине поступления, отнесённых к величине поступления:

$$\begin{aligned} \frac{A_{LUNG}(t)}{I} = & \frac{1}{I} \left\{ A_{BB}(t) + A_{bb}(t) + A_{AI}(t) + A_{THLN}(t) + \right. \\ & + 0,0095 (A_{ST_0}(t) + A_{ST_1}(t) + A_{ST_2}(t)) + \frac{A_{blood}(t)}{8} \left. \right\} = \\ & = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля} \quad (10) \end{aligned}$$

где Z – количество значимых компонент функции удержания в лёгких.

При расчётах функций выведения радионуклидов с мочой и калом, а также функций удержания в лёгких использовались две комбинированные модели: при пероральном поступлении – модель внелёгочного пула, содержащая в себе модель пищеварительного тракта, при ингаляционном поступлении – модель дыхательного тракта плюс та же самая модель внелёгочного пула, содержащая модель пищеварительного тракта.

Параметры абсорбции плутония из дыхательного тракта в кровь для различных типов соединений при ингаляционном поступлении радионуклида в форме аэрозольных частиц и параметры абсорбции из пищеварительного тракта в кровь при пероральном поступлении, а также дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального путей поступления Pu-238 и Pu-239 в организме работника, были заимствованы из Публикации № 141 МКРЗ и компьютерной программы OIR_2022_Data_Viewer. Общее количество компартментов при моделировании поведения соединений Pu-238 и Pu-239 в организме варьировалось от 29 до 57.

⁴ Данная компонента была обнаружена на стадии контроля качества расчётов в сравнении с программой OIR_2022_Data_Viewer.

Сравнение оценок ОЭД при использовании новых OIR моделей МКРЗ и стандартной модели МКРЗ (в связке Публикаций №№ 30, 66 и 67) для соединений типов М (Промежуточные) и S (Медленные) Pu-239 при АМАД=1 мкм на основе единичного измерения его активности в СКМ или СКК представлено в работе А.Б. Соколовой с соавт [31].

Интеграция моделей OIR для Am-241

Радионуклид Am-241 является α -излучателем с усреднённой энергией 5,49 МэВ, а также γ -излучателем с основной энергетической линией 59,5 кэВ с выходом 35,8 %. Период полураспада Am-241 составляет 432,6±0,6 лет, скорость распада 4,39E-6 сут⁻¹. Модель внелёгочного пула для изотопов Am, а также скорости перехода между компартментами, представлена в публикации № 141 МКРЗ.

ИДК внутреннего облучения от Am-241 основан на интерпретации серии измерений активности радионуклида в СКМ, СКК, лёгких, печени или скелете. Доля активности радионуклида в СКМ при однократном поступлении в организм может быть вычислена, как для Sr-90 по формулам (5) и (6), в СКК – как для плутония – по формулам (8) и (9). Доля активности в лёгких может быть вычислена, так же как и для плутония по формуле (10).

Доля активности (функция удержания) в печени рассчитывалась как сумма активностей в отделах печени 1 и 2, и в 1/10 доли крови, отнесённых к величине поступления, отнесённых к величине поступления:

$$\begin{aligned} \frac{A_{LIV}(t)}{I} = & \frac{1}{I} \left\{ A_{LIV_1}(t) + A_{LIV_2}(t) + \frac{A_{blood}(t)}{10} \right\} = \\ & = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля} \quad (11) \end{aligned}$$

где Z – количество значимых компонент функции удержания в печени.

Доля активности (функция удержания) в скелете рассчитывалась как сумма активностей в трёх трабекулярных отделах (поверхность, объём и мозг), аналогичных трёх кортикальных отделах и в 7 % крови, отнесённых к величине поступления, отнесённых к величине поступления:

$$\begin{aligned} \frac{A_{SK}(t)}{I} = & \frac{1}{I} \left\{ A_{TR_S}(t) + A_{TR_V}(t) + A_{TR_M}(t) + A_{C_S}(t) + A_{C_V}(t) + \right. \\ & + A_{C_M}(t) + 0,07 A_{blood}(t) \left. \right\} = \sum_{k=1}^Z a_k e^{b_k t}, \text{ доля} \quad (12) \end{aligned}$$

где Z – количество значимых компонент функции удержания в скелете.

При расчётах функций выведения радионуклида с мочой и калом, а также функций удержания в лёгких, печени и скелете использовались две комбинированные модели: при пероральном поступлении – модель внелёгочного пула, содержащая в себе модель пищеварительного тракта, при ингаляционном поступлении – модель дыхательного тракта плюс та же самая модель внелёгочного пула, содержащая модель пищеварительного тракта.

Параметры абсорбции Am-241 из дыхательного тракта в кровь для различных типов соединений при ингаляционном поступлении радионуклида в форме аэрозольных частиц и параметры абсорбции из пищеварительного тракта в кровь при пероральном поступлении, а также дозовые коэффициенты для ингаляционного и перорального путей поступления Am-241 в организме работника,

были заимствованы из Публикации № 141 МКРЗ и компьютерной программы OIR_2022_Data_Viewer. Общее количество компартментов при моделировании поведения соединений Ам-241 в организме варьировалось от 26 до 54.

Контроль качества расчётов функций выведения и удержания

Для контроля качества функций выведения и удержания выбранных радионуклидов были выполнены расчёты доли активности в биологических объектах по всем биокинетическим моделям. В качестве опорных значений использовалась доля активности в биообъектах для различных времён 1,2, ..., 100 с шагом 1 сут; 110,120, ..., 1100 с шагом 10 сут; 1200,1300 ... 3600 с шагом 100 сут, и так далее до 18250 сут (всего около 245 значений), рассчитанных в программе OIR_2022_Data_Viewer, разработанной МКРЗ, с точностью до 2 значащих цифр после запятой. Для каждой комбинации «биокинетическая модель» + «биологический» объект была сделана оценка точности. Среднее смещение собственных оценок не превышало $\pm 1\%$ от оценок OIR_2022_Data_Viewer. Исключение составляли расчёты для первых суток по биокинетическим моделям Н-3, где расхождение достигало 23 %. Полученные в остальных случаях минимальные и максимальные относительные погрешности оценок $\pm 5\%$ были обусловлены округлением чисел в программе OIR_2022_Data_Viewer до двух значащих цифр. Типичный результат контроля качества (Pu-239, диоксид, АМАД=5 мкм, СКК) представлен на рис. 2.



Рис. 2. Контроль качества оценок функции выведения Pu-239 в СКК, тип соединений – диоксид, АМАД=5 мкм. По оси абсцисс – время в сутках, по оси ординат – относительное расхождение в процентах между iDose 2 и OIR_2022_Data_Viewer.

Fig. 2. Quality control of estimates of the function of excretion of Pu-239 in the daily amount of feces, the type of compounds is dioxide, AMAD = 5 microns. On the abscissa axis is the time in days, on the ordinate axis is the relative error in percentages between iDose 2 and OIR_2022_Data_Viewer.

Заключение

В результате проделанной работы в дозиметрическую систему iDose 2 были интегрированы биокинетические модели Н-3, Sr-90/Y-90, Pu-238, Pu-239 и Am-241 и соответствующие дозовые коэффициенты для случаев перорального и ингаляционного поступления в организм работников, представленные в OIR серии из Публикаций МКРЗ № 100, 134, 137 и 141. Для Cs-137 рассмотрен только случай перорального поступления хло-

рида, нитрата и сульфата цезия или неспецифических соединений.

Проведён контроль качества оценок долей активности радионуклидов в биологических объектах при однократном поступлении в широком диапазоне времени от 1 до 18250 сут. Среднее смещение собственных оценок не превышало $\pm 1\%$ от оценок, представленных в компьютерной программе OIR_2022_Data_Viewer, разработанной в МКРЗ. Полученные минимальные и максимальные погрешности оценок $\pm 5\%$ были обусловлены округлением в ней до двух значащих цифр после запятой.

Таким образом, функционал дозиметрической системы iDose 2, разработанной в ЮУрИБФ, позволяющей производить оценки нормируемых величин внутреннего облучения и их неопределённостей, был значительно расширен за счёт интеграции новых биокинетических моделей OIR из Публикаций МКРЗ. Информация об итоговом наборе биокинетических моделей в дозиметрической системе iDose 2 на конец 2022 года представлен в табл. 2.

Таблица 2

Информация об итоговом наборе биокинетических моделей в дозиметрической системе iDose 2 и связанных с ними биологических объектах (на конец 2022 года)

Радионуклид	Виды моделей МКРЗ	Количество биокинетических моделей	Коды биологических объектов*	Количество функций удержания/выведения
H-3	Старые	3	U, W	6
	OIR	15		30
	Всего	18		36
Sr-90	Старые	3	U, F	6
	OIR	8		8
	Всего	11		14
Cs-137	Старые	2	B	2
	OIR	1		1
	Всего	3		3
Pu-238	Старые	2	U, F	4
	OIR	18		54
	Всего	20		60
Pu-239	Старые	25	U, F	50
	OIR	14		42
	Всего	39		92
Am-241	Старые	1	L, V, S U, F, L, V, S	3 45
	OIR	9		
	Всего	10		48
Итого		101	–	253

Примечание: * U – моча, W – конденсат паров выдыхаемого воздуха, F – кал, B – всё тело, L – лёгкие, V – печень, S – скелет

Математическая обработка серии результатов измерений активности радионуклидов в биологических объектах на основе байесовского подхода, заложенная изначально в дозиметрическую систему iDose 2, представленная в МУК 2.6.5.045 – 2016 и статье [12], осталась без изменений. Всего на конец 2022 года можно было проводить оценки ОЭД и их неопределённости с использованием 101 биокинетической модели (из них 65 OIR) и 253 функций удержания/ выведения активности радионуклидов (из них 180 OIR).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования: Методические указания МУ 2.6.1.065-2014. М.: ФМБА России, 2014.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.
3. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 1 // ICRP. 1979.
4. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 2 // ICRP. 1980.
5. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 3 // ICRP. 1981.
6. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: An Addendum. Part 4 // ICRP. 1988.
7. ICRP. Publication 54. Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers // ICRP. 1989.
8. ICRP. Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // ICRP. Pergamon Press, 1994.
9. ICRP. Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Ingestion Dose Coefficients. Part 2 // ICRP. Pergamon Press, 1993.
10. ICRP. Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers // ICRP. 1994.
11. Востротин В.В. Указания по методам контроля (мук) для определения доз внутреннего облучения персонала при стандартных и специальных условиях. Методика выполнения расчётов: Методические указания по методам контроля МУК 2.6.5.045. 2016. М.: ЮУрИБФ, 2016.
12. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) внутреннего облучения профессиональных работников с помощью компьютерной программы «iDose 2» на основе Байесовского подхода // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 2. С. 45-54.
13. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Тестирование системы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения профессиональных работников при ингаляционном поступлении нерастворимых соединений плутония с помощью компьютерной программы iDose 2 // Вопросы радиационной безопасности. 2016. № 3. С. 78-83.
14. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Апробация компьютерной программы iDose 2 применительно к задачам индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения персонала ФГУП ПО «МАЯК» при ингаляционном поступлении плутония // Ари. 2017. № 4. С. 45-54.
15. Востротин В.В. и др. Способ индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения профессиональных работников с помощью компьютерной программы «iDose 2» // Патент RU 2650075 С2. 2018.
16. Молоканов А.А. Расчёт ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения персонала по результатам измерений активности радионуклидов в биопробах с использованием компьютерной программы ММК-01: Методика выполнения расчётов МВР 2.6.1.60-2002. М.: 2005.
17. Молоканов А.А. Методика расчета эффективной дозы внутреннего облучения персонала по результатам измерений активности радионуклидов в теле человека и в биопробах (базовый вариант). ММК-02. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2012.
18. Отчет о научно-исследовательской работе. методическое обеспечение практики индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения персонала и радиационно-гигиеническая оценка территории его проживания (заключительный) / Рук. Ефимов А.В. М.: ЮУрИБФ, 2018. 104 с.
19. Отчет о научно-исследовательской работе. развитие методического обеспечения практики индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения персонала радиационно опасных предприятий (заключительный) / Рук. Ефимов А.В. М.: ЮУрИБФ, 2019. 73 с.
20. Отчет о научно-исследовательской работе. последовательное развитие основ и практики дозиметрии профессионального внутреннего облучения (заключительный) / Рук. Сыпко С.А. М.: ЮУрИБФ, 2020. 136 с.
21. ICRP. Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 1 // ICRP. 2015.
22. ICRP. Publication 100. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection // ICRP. 2006.
23. ICRP. Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection // ICRP. 2007.
24. ICRP. Publication 134. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 2 // ICRP. 2016.
25. ICRP. Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 3 // ICRP. 2017.
26. ICRP. Publication 141. Occupational intakes of Radionuclides. Part 4 // ICRP. 2019.
27. Отчет о научно-исследовательской работе. Совершенствование методов контроля и изучение особенностей формирования доз внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк» и населения прилегающих территорий / Рук. Ефимов. М.: ЮУрИБФ, 2022. 253 с.
28. Отчет о научно-исследовательской работе. развитие организационного и методического обеспечения индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения (заключительный) / Рук. Ефимов А.В. М.: ЮУрИБФ, 2013. 111 с.
29. ICRP. Publication 89. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values // ICRP. Pergamon Press, 2002.
30. ICRP. Publication 23. Report on the Task Group on Reference Man // ICRP. Pergamon Press, 1975.
31. 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.

REFERENCES

1. Dosimetry Control of Occupational Internal Exposure. General Requirements. Guidelines MU 2.6.1.065-2014. Moscow Publ., 2014 (In Russ.).
2. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009): Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow Publ., 2009 (In Russ.).
3. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 1. ICRP. 1979.
4. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 2. ICRP. 1980.
5. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 3. ICRP. 1981.
6. ICRP. Publication 30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: An Addendum. Part 4. ICRP. 1988.
7. ICRP. Publication 54. Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP. 1989.
8. ICRP. Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP. Pergamon Press, 1994.
9. ICRP. Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Ingestion Dose Coefficients. Part 2. ICRP. Pergamon Press, 1993.
10. ICRP. Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP. 1994.
11. Vostrotin V.V. Guidelines on Control Methods MUK 2.6.5.045 - 2016. Instructions on Control Methods for Determining Internal Exposure Dose for Personnel under Standard and Special Conditions. Methodology for Performing Calculations. Moscow Publ., 2016 (In Russ.).
12. Vostrotin V.V., Zhdanov A.N., Efimov A.V. Individual Dosimetry Monitoring (IDC) of Internal Exposure of Professional Workers Using the Computer Program «iDose 2» Based on the

- Bayesian Approach. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues.* 2016;2:45-54 (In Russ.).
13. Vostrotin V.V., Zhdanov A.N., Efimov A.V. Testing the System of Individual Dosimetry Monitoring (IDC) of Internal Exposure of Professional Workers During Inhalation Intake of Insoluble Plutonium Compounds Using the iDose 2 Computer Program. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues.* 2016;3:78-83 (In Russ.).
14. Vostrotin V.V., Zhdanov A.N., Efimov A.V. Approbation of the iDose 2 Computer Program in Relation to the Tasks of Individual Dosimetry Control (IDC) of Internal Irradiation of Personnel of FSUE PO "MAYAK" During Inhalation of Plutonium. ANRI. 2017;4:45-54 (In Russ.).
15. Vostrotin V.V., et al. A Method of Individual Dosimetric Control of Internal Irradiation of Professional Workers Using the Computer Program "iDose 2". Patent RU 2650075 C2. 2018 (In Russ.).
16. Molokanov A.A. Method of Performing Calculations of MVR 2.6.1.60-2002. Calculation of the Expected Effective Doses of Internal Irradiation of Personnel Based on the Results of Measurements of the Activity of Radionuclides in Bioassays Using the MMK-01 Computer Program. Moscow Publ., 2005 (In Russ.).
17. Molokanov A.A. Methodology for Calculating the Effective Dose of Internal Irradiation of Personnel Based on the Results of Measurements of the Activity of Radionuclides in the Human Body and in Bioassays (Basic Version). MMK-02. Moscow, A.I. Burnazyan FMBC Publ., 2012 (In Russ.).
18. Methodological Support of the Practice of Individual Dosimetric Control of Professional Internal Irradiation of Personnel and Radiation-Hygienic Assessment of the Territory of His Residence (Final). Report on Research Work. Moscow Publ., 2018. 104 p. (In Russ.).
19. Development of Methodological Support for the Practice of Individual Dosimetric Control of Professional Internal Exposure of Personnel of Radiation Hazardous Enterprises (Final). Report on Research Work. Moscow Publ., 2019. 73 p. (In Russ.).
20. Consistent Development of the Basics and Practice of Dosimetry of Professional Internal Irradiation (Final). Report on Research Work. Moscow Publ., 2020. 136 p. (In Russ.).
21. ICRP. Publication 130. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 1. ICRP. 2015.
22. ICRP. Publication 100. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP. 2006.
23. ICRP. Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. 2007.
24. ICRP. Publication 134. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 2. ICRP. 2016.
25. ICRP. Publication 137. Occupational Intakes of Radionuclides. Part 3. ICRP. 2017.
26. ICRP. Publication 141. Occupational intakes of Radionuclides. Part 4. ICRP. 2019.
27. Improvement of Control Methods and Study of the Peculiarities of the Formation of Internal Radiation Doses of the Personnel of FSUE "PO "Mayak" and the Population of Adjacent Territories. Report on Research Work. Moscow Publ., 2022. 253 p. (In Russ.).
28. Development of Organizational and Methodological Support for Individual Dosimetric Control of Professional Internal Irradiation. (Final). Report on Research Work. Moscow Publ., 2013. 111 p. (In Russ.).
29. ICRP. Publication 89. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP. Pergamon Press, 2002.
30. ICRP. Publication 23. Report on the Task Group on Reference Man. ICRP. Pergamon Press, 1975.
31. Sokolova A.B., Efimov A.V., Dzhunushaliyev A.B. Analysis of Compliance of the Current System of Individual Dosimetric Control of Internal Irradiation Caused by Plutonium Intake with the Relevant Recommendations of the ICRP. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene.* 2022;15;3:50-57 (In Russ.).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Работа выполнена в рамках НИР «Совершенствование методов контроля и изучение особенностей формирования доз внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк» и населения прилегающих территорий», шифр «Луч-22», финансируемой ФМБА России.

Участие авторов. Концептуальная разработка, создание скриптов R, математические расчёты и их контроль качества выполнены одним автором.
Поступила: 20.04.2023. Принята к публикации: 27.05.2023.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Financing. The work was carried out within the framework of the research project "Improving control methods and studying the peculiarities of the formation of internal radiation doses of the personnel of FSUE "PO "Mayak" and the population of adjacent territories", cipher "Luch-22", funded by the FMBA of Russia.

Contribution. Conceptual development, creation of R scripts, mathematical calculations and their quality control were carried out by one author.

Article received: 20.04.2023. Accepted for publication: 27.05.2023.