

А.А. Молоканов, Н.П. Поцяпун, Е.Ю. Максимова

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ МКРЗ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОЗ ПЕРСОНАЛА ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОМ ПОСТУПЛЕНИИ РАДИОНУКЛИДОВ УРАНА

Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Андрей Алексеевич Молоканов, e-mail: andrei.molokanov@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Гармонизация и совершенствование системы нормирования внутреннего облучения персонала и основных требований к обеспечению радиационной безопасности с учетом применения новых международных требований и рекомендаций.

Материал и методы: Представлено краткое описание процедуры расчета поглощенных и эквивалентных доз в органах и тканях при поступлении радионуклидов внутрь организма человека с учетом принятых в новых рекомендациях МКРЗ биокинетических и дозиметрических моделей, а также обсуждение влияния этих изменений на результаты расчетов дозовых коэффициентов для случая ингаляционного поступления радионуклида урана-235.

Результаты: Проведен расчет значений эффективной дозы и эквивалентных доз на органы и ткани для персонала в зависимости от времени после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235, по новым моделям [1–12] и по предыдущим моделям МКРЗ [15, 16]. Расчет эффективной дозы по новым моделям включал в себя расчеты эквивалентных доз для 14 основных органов и тканей и 13 органов и тканей, отнесенных к группе «остальные ткани», как представлено в публикации 103 МКРЗ [3]. Ожидаемую эффективную дозу затем вычисляли в соответствии с новым подходом с использованием среднего значения эквивалентных доз для эталонного взрослого мужчины, H_T^M и эталонной взрослой женщины H_T^F , а также обновленных значений взвешивающих коэффициентов для тканей и органов, W_T , принятых в Публикации 103 МКРЗ. Представлены графики зависимости значений эффективной дозы и эквивалентных доз на красный костный мозг, легкие и остальные ткани от времени в диапазоне от нескольких до 18 250 сут (50 лет) после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 типов соединений F, M, S, F/M и M/S для стандартного значения АМАД=5 мкм по новым и предыдущим моделям МКРЗ.

Показано, что значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное по новым моделям, меньше того, которое рассчитано по предыдущим моделям МКРЗ в 2,6 раз ($2,3E-07 \div 6,0E-07$), а значение дозового коэффициента для типа соединения F/M, рассчитанное по новым моделям, в 1,6 раз ($3,8E-07 \div 6,0E-07$) меньше, чем значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное предыдущим моделям МКРЗ. Для триоксида урана (uranium trioxide UO_3), с учетом его перевода из типа соединения M в F/M, значение дозового коэффициента ожидаемой эффективной дозы по обновленной модели дыхательного тракта меньше соответствующего значения по предыдущей модели дыхательного тракта типа M в 4,7 раз ($3,8E-07 \div 1,8E-06$). Значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения M, рассчитанное по новым моделям, в 1,4 раза ($1,3E-06 \div 1,8E-06$) меньше, чем то же значение, рассчитанное по предыдущим моделям МКРЗ. Значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения M/S, к которым по новой модели дыхательного тракта относят оксид U_3O_8 и диоксид урана UO_2 , рассчитанное по новым моделям, в 1,2 раза ($5,1E-06 \div 6,1E-06$) меньше значения, рассчитанного по предыдущим моделям МКРЗ для соединений типа S, к которым относили U_3O_8 и UO_2 по предыдущей модели дыхательного тракта.

Заключение: Из приведенных выше данных следует, что в случае перехода норм радиационной безопасности (НРБ) к новым моделям МКРЗ различия в значениях дозовых коэффициентов приведут к изменению в соответствующих пропорциях пределов годовых поступлений (ППП) для указанных выше типов соединений урана.

Ключевые слова: уран, ингаляционное поступление, дозовый коэффициент, биокинетическая модель, дозиметрическая модель, внутреннее облучение, поглощенная доза, эквивалентная доза, органы и ткани, ожидаемая эффективная доза, новые рекомендации МКРЗ

Для цитирования: Молоканов А.А., Поцяпун Н.П., Максимова Е.Ю. Применение новых рекомендаций МКРЗ для расчета доз персонала при ингаляционном поступлении радионуклидов урана // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 6. С. 24–29. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-24-29

A.A. Molokanov, N.P. Potsyapun, E.Yu. Maksimova

Application of New ICRP Recommendations on Dose Calculation for Workers after Inhalation Intake of Uranium Radionuclides

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: Andrey Alekseevich Molokanov, e-mail: andrei.molokanov@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: Harmonization and improvement of the system for regulating the internal radiation exposure of workers and the basic requirements for ensuring radiation safety, taking into account the application of new international requirements and recommendations.

Material and methods: A brief description of the procedure for calculating absorbed and equivalent doses in organs and tissues after the intake of radionuclides into the human body is presented, using the biokinetic and dosimetric models adopted in the new ICRP recommendations, as well as a discussion of the impact of these changes on the results of calculating dose coefficients for the case of inhalation intake of uranium-235 radionuclide.

Results: The effective dose values and equivalent doses to organs and tissues for workers were calculated depending on the time after a single inhalation intake of uranium-235 aerosol, according to new models [1–12] and according to previous ICRP models [15, 16]. The calculation of the effective dose according to the new models included calculations of equivalent doses for 14 main organs and tissues and 13 organs and tissues classified as “remainder tissues” as described in ICRP Publication 103 [3]. The committed effective dose was then calculated according to the new approach using the average of the equivalent doses for the reference adult male, H_T^M , and the reference adult female, H_T^F , as well as the tissue and organ weighting factors, W_T , adopted in ICRP Publication 103. The values of the effective dose and equivalent doses on the red bone marrow, lungs and remainder tissues vs time in the range from several days to 18250 days (50 years) after a single inhalation intake of an aerosol of uranium-235 for standard value AMAD=5 μm and types of compounds F, M, S, F/M and M/S are presented according to new and previous ICRP models.

It is shown that the value of the dose coefficient for type F, calculated by new models, is 2.6 times ($2.3\text{E-}07 \div 6.0\text{E-}07$) less than that calculated by previous ICRP models, and the value of the dose coefficient for type F/M calculated by new models is 1.6 times ($3.8\text{E-}07 \div 6.0\text{E-}07$) less than the value of the dose coefficient for type F calculated by previous ICRP models. For uranium trioxide UO_3 , taking into account its transition from compound type M to F/M, the value of the dose coefficient for committed effective dose according to the updated model of the respiratory tract is 4.7 times ($3.8\text{E-}07 \div 1.8\text{E-}06$) less than the corresponding value for the previous model of the type M respiratory tract. The committed effective dose value for compound type M, calculated using the new models, is 1.4 times ($1.3\text{E-}06 \div 1.8\text{E-}06$) less than the same value calculated using the previous ICRP models. The value of the committed effective dose for type M/S compounds (which, according to the new model of the respiratory tract, include uranium oxide U_3O_8 and dioxide UO_2), calculated according to new models, is 1.2 times ($5.1\text{E-}06 \div 6.1\text{E-}06$) less than the value calculated from previous ICRP models for type S compounds (which included U_3O_8 and UO_2 in the previous respiratory tract model). **Conclusion:** From the above data it follows that in case of the adoption of national radiation safety standards to new ICRP models, differences in the values of dose coefficients will result in a change of annual limits of intake (ALI) in the corresponding proportion for the types of uranium aerosol compounds noted above.

Keywords: uranium, inhalation intake, dose coefficient, internal exposure, biokinetic model, dosimetric model, absorbed dose, equivalent dose, organs and tissues, committed effective dose, new ICRP recommendations

For citation: Molokanov AA, Potsyapun NP, Maksimova EYu. Application of New ICRP Recommendations on Dose Calculation for Workers after Inhalation Intake of Uranium Radionuclides. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(6):24–29. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-24-29

Введение

Принятые в рекомендациях МКРЗ 2006–2019 гг. [1–12] изменения привели к необходимости разработки новой технологии расчета доз внутреннего облучения, образующихся при поступлении радионуклидов внутрь организма человека. В Публикации 103 МКРЗ [3] изменения внесены в значения взвешивающих коэффициентов для отдельных видов излучения, W_R , (табл. 1) и для тканей и органов, W_T , (табл. 2) по сравнению со значениями, ранее рекомендованными в Публикации 60 МКРЗ (ICRP, 1991) [13].

Таблица 1

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения, W_R , принятые в Публикации 103 МКРЗ в сравнении с Публикацией 60 МКРЗ
Weighting factors for different types of radiation, W_R , adopted in ICRP Publication 103 versus ICRP Publication 60

Тип излучения	Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения, W_R	
	Публикация 103 (МКРЗ, 2007)	Публикация 60 (МКРЗ, 1991)
Фотоны	1	1
Электроны и мюоны	1	1
Протоны и заряженные пионы	2	5*
α -частицы, осколки деления, тяжелые ионы	20	20
Нейтроны	Пересмотренная непрерывная функция энергии нейтронов	Ступенчатая и непрерывная функция энергии нейтронов

Примечание: * Пионы не рассматривались

Изменения значений взвешивающих коэффициентов для органов и тканей при расчете эффективной дозы, W_T , отражают улучшение знаний о радиационных рисках и основаны на данных о заболеваемости раком, а не на данных о смертности, с учетом летальности, потери качества жизни и потерянных лет жизни. Основными изменениями значений коэффициента W_T являются увеличение для молочной железы (с 0,05 до 0,12), уменьшение

для половых желез (с 0,2 до 0,08) и включение большего количества органов и тканей в категории «остальные» (от 0,05 до 0,12). Весовые коэффициенты ткани по-прежнему представляют средние значения по полу и по всем возрастам [3].

Таблица 2

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов, W_T , принятые в Публикации 103 МКРЗ
Weighting factors for tissues and organs, W_T , adopted in ICRP Publication 103

Ткань	W_T	ΣW_T
Костный мозг, грудь, толстая кишка, легкое, желудок, остальные ткани (по 13 для каждого пола*)	0,12	0,72
Гонады	0,08	0,08
Мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа	0,04	0,16
Поверхность кости, мозг, слюнные железы, кожа	0,01	0,04

Примечание: * Остальные ткани: надпочечники, экстракратальные отделы дыхательного тракта (ЕТ), желчный пузырь, сердце, почки, лимфатические узлы, мышцы, слизистая оболочка полости рта, поджелудочная железа, простата (мужчины), тонкая кишка, селезенка, тимус и матка / шейка матки (женщина).

Еще одно важное изменение заключается в том, что дозы облучения рассчитываются с использованием эталонных вычислительных фантомов человеческого тела, представленных в публикации 110 МКРЗ [5]. Воксельные модели, построенные на основе данных медицинских изображений реальных людей, дают более реалистичное описание человеческого тела, чем в математических (или стилизованных) фантомах, используемых ранее. Учитывая это, МКРЗ рекомендовала использовать воксельные модели для определения эталонных фантомов, которые будут использоваться при расчетах распределения дозы в организме как для внутреннего, так и для внешнего облучения. Эти воксельные модели (или вычислительные фантомы) представляют собой эталон взрослого мужчины и эталон взрослой женщины. Они предназначены специально для расчета величин радиационной защиты, соответствующих концепции эффективной дозы. Эквивалентные дозы для органов и тканей рассчитываются

отдельно для эталонного взрослого мужчины, H_T^M и эталонной взрослой женщины H_T^F и затем усредняются при расчете эффективной дозы, E_T [5]:

$$E = \sum_T W_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right] \quad (1)$$

В Публикации 103 МКРЗ специально подчеркивается, что эффективная доза предназначена для использования в качестве защитной величины на основе эталонных значений и относится к эталонным (reference) лицам, а не к конкретным лицам. Основное применение эффективной дозы – это проспективная оценка дозы для планирования и оптимизации радиационной защиты, а также ретроспективная демонстрация соответствия для целей регулирования. Эффективная доза – это не индивидуальная величина дозы, а доза для эталонного лица при определенных условиях воздействия. В общем случае эталонным лицом может быть либо стандартный работник, либо эталонное лицо из населения определенного возраста [3].

Значения эквивалентных доз на органы и ткани рассчитываются с учетом новых справочных данных об основных анатомических и физиологических параметрах стандартных мужчины и женщины, представленных в публикации 89 МКРЗ [1], а также новых значений коэффициентов удельной поглощенной фракции (SAF), необходимых для расчета удельных эффективных энергий (SEE), и эквивалентной дозы. Коэффициенты SAF были рассчитаны с использованием эталонных вычислительных фантомов человеческого тела [5], и их значения представлены в приложениях к публикации 133 МКРЗ [7]. Кроме этого, были введены обновления в модель дыхательного тракта публикации 66 МКРЗ [6], биокинетических системных моделей для ряда радионуклидов, принятых в серии публикаций 130, 134, 137 и 141 МКРЗ OIR [6, 8–10], а модель пищеварительного тракта (ЖКТ), которая была введена в публикации 30 МКРЗ [14] и использовалась в последующих публикациях [16], была заменена на новую, физиологически более точную модель, представленную в публикации 100 МКРЗ [2].

В данной статье представлено краткое описание процедуры расчета поглощенных и эквивалентных доз в органах и тканях при поступлении радионуклидов внутрь организма человека с учетом принятых в новых рекомендациях МКРЗ биокинетических и дозиметрических моделей, а также обсуждение влияния этих изменений на результаты расчетов дозовых коэффициентов для случая ингаляционного поступления радионуклида урана-235¹.

Процедура расчета дозовых характеристик

Процедура расчета доз внутреннего облучения в соответствии с новыми рекомендациями МКРЗ [1–12] включает в себя определение ожидаемых эквивалентных доз для 14 основных органов и тканей и 13 органов и тканей, отнесенных к группе «остальные ткани», которым приписано значение взвешивающих коэффициентов, W_T , представленных в табл. 2. Ожидаемую эффективную дозу затем вычисляют по формуле (1) и

представляют в виде дозового коэффициента в единицах Зв / (Бк поступления). Эквивалентные дозы для органов и тканей определяют путем решения уравнений, описывающих эталонные биокинетические модели МКРЗ: дыхательного тракта [6], пищеварительного тракта [2] и системной модели рассматриваемого радионуклида [8–10]. Решением этих уравнений являются значения активности радионуклида в органах и тканях $A_j(t)$ в зависимости от времени t , прошедшего после поступления радионуклида. Далее, расчет эквивалентной дозы на области-мишени для эталонного взрослого мужчины $H^M(r_T, \tau)$ и эталонной взрослой женщины $H^F(r_T, \tau)$ для времени интегрирования τ проводят по формулам [6]:

$$H^M(r_T, \tau) = \sum_{r_S} A(r_S, \tau) S_w^M(r_T \leftarrow r_S) \quad (2)$$

$$H^F(r_T, \tau) = \sum_{r_S} A(r_S, \tau) S_w^F(r_T \leftarrow r_S), \quad (3)$$

где коэффициенты $S_w^M(r_T \leftarrow r_S)$ и $S_w^F(r_T \leftarrow r_S)$ – это взвешенные эквивалентные дозы облучения в области-мишени r_T , полученные в результате ядерных превращений радионуклида в области-источнике r_S [Зв·(Бк·с)⁻¹] для персонала мужского и женского пола соответственно; $A(r_S, \tau)$ – число ядерных превращений радионуклида в области-источнике r_S [Бк·с]:

$$A(r_S, \tau) = \sum_j \int_0^\tau A_j(t) dt \quad (4)$$

где τ – период интегрирования; суммирование проводят по всем отделам j , входящим в область-источник r_S , $A_j(t)$ – активность радионуклида в отделе j в момент времени t .

Коэффициент $S_w(r_T \leftarrow r_S)$ рассчитывают по формуле:

$$S_w(r_T \leftarrow r_S) = \sum_R W_R \sum_i E_{R,i} Y_{R,i} \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i}), \quad (5)$$

где $E_{R,i}$ – энергия i -го излучения типа R , испускаемого при ядерных превращениях радионуклида;

$Y_{R,i}$ – выход i -го излучения типа R на ядерное превращение (Бк·с)⁻¹;

W_R – взвешенный коэффициент для излучения типа R (табл. 1);

$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$ – удельная поглощенная фракция (SAF), определяемая как доля энергии $E_{R,i}$ излучения типа R , испускаемого в ткани-источнике, которая поглощается на единицу массы в ткани-мишени r_T (кг⁻¹).

Справочные данные о распаде ядер, а именно об энергии i -го излучения типа R , испускаемого при ядерных превращениях радионуклида, и выходе i -го излучения типа R на ядерное превращение, находятся в Публикации 107 МКРЗ [4]. Данные об удельных поглощенных фракциях (SAF) для эталонного взрослого мужчины и эталонной взрослой женщины представлены в дополнительных материалах к Публикации 133 МКРЗ [7]. Файлы SAF содержат 43 области-мишени и 79 областей-источников (некоторые органы и ткани содержат в себе несколько областей-мишеней и областей-источников). Порядковый номер записи в файле SAF для i -ой области-мишени и j -ой области-источника вычисляется по формуле:

$$N_{\text{rec}} = 43(j-1) + i + 5.$$

В новой дозиметрической модели одним из 79 областей-источников является кровь, вклад которой необходимо учитывать в облучение любой мягкой ткани, используя формулы (2)–(5). Те мягкие ткани, которые не включены в камерную биокинетическую модель в явном виде, относят к «прочим мягким тканям» (ST), включен-

¹ Представленные в статье закономерности распространяются на радионуклиды уран-234 и уран-238, входящие, как и уран-235, в состав природного и обогащенного урана. Это обусловлено тем, что биокинетика долгоживущих радионуклидов урана в организме человека одинакова, а дозовые коэффициенты с точностью до округления значения дозового коэффициента [9] пропорциональны суммарной энергии альфа-частиц и ядер отдачи, которая равна: 4,843, 4,469 и 4,187 МэВ для радионуклидов уран-234, уран-235 и уран-238 соответственно [4].

ным в системную биокинетическую модель в виде трех камер: $ST0$, $ST1$ и $ST2$. В этом случае значение удельной поглощенной фракции $\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i})$ для ткани-мишени r_T в уравнении (5) определяют по формуле:

$$\Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i}) = \frac{M_{r_S}}{M_{ST}} \Phi(r_T \leftarrow r_S, E_{R,i}) \quad (6)$$

Если не указано специально в описании биокинетической модели, к «прочим мягким тканям» не относят минеральную кость в кортикальной и трабекулярной форме. Массы областей-источников M_{r_S} , включая, массу «прочих мягких тканей», M_{ST} представлены в таблице А.3 публикации 133 МКРЗ [7].

Результаты расчета дозовых характеристик

Используя описанную выше процедуру расчета дозовых характеристик, были рассчитаны значения эффективной дозы для персонала в зависимости от времени в диапазоне от нескольких суток до 18250 сут (50 лет) после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235, типов соединений F, M, S и M/S и стандартного значения АМАД=5 мкм, по новым моделям МКРЗ (OIR) [1–12] и по предыдущим моделям, публикации 66/67 МКРЗ [15, 16]. Расчеты эффективной дозы включали в себя расчеты эквивалентных доз для 14 основных органов и тканей и 13 органов и тканей, отнесенных к группе «остальные ткани», как описано выше. На рис. 1 показано как формируется эффективная доза со временем в течение 50 лет после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 для стандартного значения АМАД=5 мкм и типов соединений F и F/M² по новым (OIR) и предыдущим (публикации 66/67) моделям МКРЗ. В правой части, в конце линий, показаны значения дозовых коэффициентов ожидаемой эффективной дозы, которые рассчитываются для времени интегрирования $\tau=50$ лет.

На рис. 1 видно, что значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное по новым моделям меньше того, которое рассчитано по предыдущим моделям МКРЗ, в 2,6 раз ($2,3E-07 \div 6,0E-07$), а значение дозового коэффициента для типа соединения F/M, рассчитанное по новым моделям в 1,6 раз ($3,8E-07 \div 6,0E-07$) меньше, чем значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное предыдущим моделям МКРЗ. К соединениям F по обновленной модели дыхательного тракта [6] относят гексафторид урана (uranium hexafluoride, UF_6) и уранилтрибутилфосфат (uranyl tributyl-phosphate), а к соединениям F/M относят нитрат уранила (uranyl nitrate $UO_2(NO_3)_2$), гидрат перекиси урана (uranium peroxide hydrate UO_4), диуранат аммония (ammonium diuranate ADU) и триоксид урана (uranium trioxide UO_3). То есть часть соединений, отнесенных к типу F ($UO_2(NO_3)_2$) и к типу M (UO_3) по предыдущей модели дыхательного тракта [15], были отнесены к соединениям типа F/M в обновленной модели дыхательного тракта [6]. Для триоксида урана (uranium trioxide UO_3), с учетом его перевода из типа соединения M в F/M, значение дозового коэффициента ожидаемой эффективной дозы по обновленной модели дыхательного тракта [6] меньше соответствующего значения по предыдущей модели дыхательного тракта типа M [15, 17] в 4,7 раз ($3,8E-07 \div 1,8E-06$, см. далее рис. 2). Это означает,

² Согласно обновленной модели дыхательного тракта [6] аэрозоли урана, наряду со стандартными типами соединений F, M, S предыдущей модели [15], имеют дополнительные типы соединений F/M и M/S, кроме них рассматривается как отдельный тип соединения алюминид урана (uranium aluminide, UAl_3).

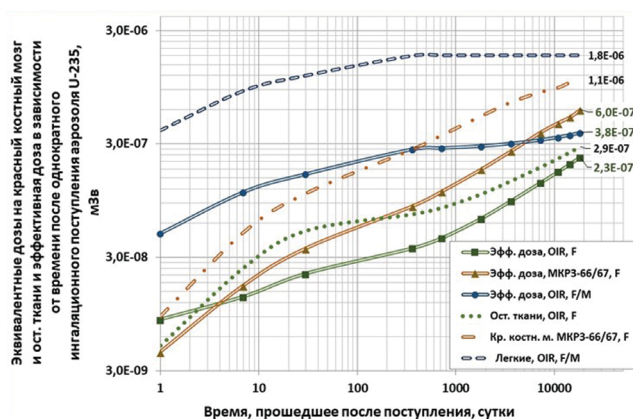


Рис. 1. Формирование эффективной дозы и эквивалентных доз на красный костный мозг, легкие и остальные ткани со временем в течение 50 лет после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 типа соединения F и F/M для стандартного значения АМАД=5 мкм по новым (OIR) и предыдущим (публикации 66/67) моделям МКРЗ

Fig. 1. Formation of an effective dose and equivalent doses on the red bone marrow, lungs and remainder tissues over a period of 50 years after a single inhalation intake of an aerosol of uranium-235 type F and F/M for a standard value of AMAD = 5 μ m according to new (OIR) and previous (publications 66/67) ICRP models

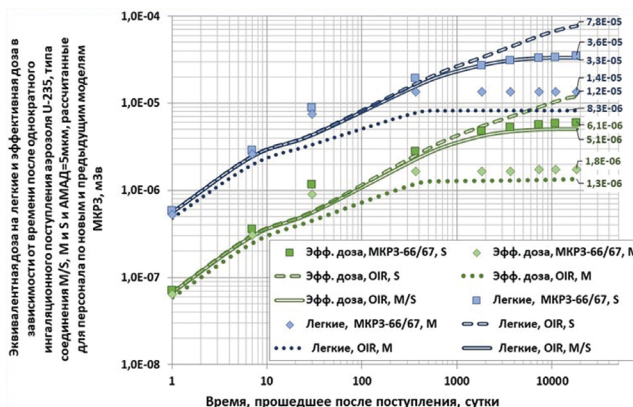


Рис. 2. Эквивалентная доза на легкие (синий цвет) и эффективная доза (зеленый цвет) в мЗв в зависимости от времени за 50-летний период после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235, типа соединения M, S и M/S с АМАД=5 мкм, рассчитанные для персонала по новым (OIR) и предыдущим (публикации 66/67) моделям МКРЗ

Fig. 2. Equivalent dose to lungs (blue color) and effective dose (green color) in mSv depending on time over a 50-year period after a single inhalation intake of uranium-235 aerosol, compound type M, S and M/S with AMAD=5 μ m, calculated for workers according to new (OIR) and previous (publications 66/67) ICRP models

что в случае перехода норм радиационной безопасности (НРБ) к новым моделям МКРЗ различия в значениях дозовых коэффициентов приведут к изменению в соответствующих пропорциях пределов годовых поступлений (ПГП) для указанных выше типов соединений урана.

Различие значений дозовых коэффициентов обусловлено, во-первых, различием параметров новой и предыдущей системных моделей для урана, приводящее при применении новых моделей к меньшим значениям активности в органах и тканях при поступлении радионуклидов урана из барьерных органов (легкие, пищевой тракт, а также поврежденная и неповрежденная кожа); во-вторых, различием дозовых моделей: в новой модели используются воксельные вычислительные фантомы человеческого тела, которые дают более точные и менее консервативные значения удельной поглощенной фракции (SAF), приводящие к меньшим значениям эквива-

лентных доз на органы и ткани по сравнению с теми, которые получают при использовании математических (или стилизованных) фантомов. На рис. 1 показано также, что динамика формирования эффективной дозы со временем в течение 50 лет после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 для типа соединения F определяется динамикой формирования эквивалентной дозы органов и тканей системной модели (для примера приведены красный костный мозг, и остальные ткани), а для типа соединения F/M – определяется динамикой формирования эквивалентной дозы барьерного органа (легкие).

На рис. 2 показано как формируется эффективная доза (зеленые линии и точки) и эквивалентная доза на легкие (синие линии и точки) со временем в течение 50 лет после поступления аэрозолей урана-235 для стандартного значения АМАД=5 мкм и типов соединений М, S и M/S, рассчитанные по новым и предыдущим моделям. В правой части в конце линий показаны значения дозовых коэффициентов ожидаемой эффективной дозы или эквивалентной дозы на легкие, которые рассчитываются для времени интегрирования $\tau=50$ лет.

На рис. 2 видно, что значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения М, рассчитанное по новым моделям, в 1,4 раза ($1,3\text{E}-06 \div 1,8\text{E}-06$) меньше, чем то же значение, рассчитанное по предыдущим моделям МКРЗ. Значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения M/S, рассчитанное по новым моделям, в 1,2 раза ($5,1\text{E}-06 \div 6,1\text{E}-06$) меньше значения, рассчитанного по предыдущим моделям МКРЗ для соединений типа S. Для типа соединения S новые модели дают максимальное значение ожидаемой эффективной дозы, которое превышает значение для типа соединения S, рассчитанное по предыдущим моделям, практически в 2 раза ($1,2\text{E}-05 \div 6,1\text{E}-06$). По обновленной модели дыхательного тракта для урана [9] к типу соединений М относят ацетилацетонат уранила (uranyl acetylacetonate), тетрафторид урана (UF_4); аэрозоли с обедненным ураном, полученные при использовании кинетической энергии снарядов (depleted uranium aerosols from use of kinetic energy penetrators) и пары металла урана (vaporised U metal); к типу соединений M/S относят оксид и диоксид урана (uranium octoxide U_3O_8 ; uranium dioxide UO_2); тип соединения S введен формально, по аналогии с предыдущей моделью дыхательного тракта [15], и к нему не относят ни одно из известных соединений урана. При отсутствии конкретной информации о том, к какому типу соединения можно отнести аэрозоли урана, например, если химическая форма неизвестна или, если химическая форма известна, но нет информации о скорости транзита этой формы из дыхательных путей, по умолчанию рекомендуется использовать тип соединения М [9].

На рис. 2 также показано, что динамика формирования эффективной дозы со временем в течение 50 лет после однократного ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 для типов соединений М, S и M/S полностью определяется динамикой формирования эквивалентной дозы в легких.

Заключение

В статье представлено краткое описание процедуры расчета поглощенных и эквивалентных доз в органах и тканях при поступлении радионуклидов внутрь организма человека с учетом принятых в новых рекомендациях МКРЗ (OIR) биокинетических и дозиметрических моделей и показано влияние этих изменений на результаты расчетов дозовых коэффициентов в сравнении с предыдущими моделями МКРЗ (публикации 66/67) для случая ингаляционного поступления аэрозоля урана-235 со стандартным значением АМАД= 5 мкм и для всех типов соединений при ингаляции F, M, S, F/M и M/S (типы соединений F/M и M/S введены в новой модели дыхательного тракта впервые).

Показано, что значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное по новым моделям, меньше того, которое рассчитано по предыдущим моделям МКРЗ, в 2,6 раз ($6,0\text{E}-07 \div 2,3\text{E}-07$), а значение дозового коэффициента для типа соединения F/M, рассчитанное по новым моделям, в 1,6 раз ($6,0\text{E}-07 \div 3,8\text{E}-07$), меньше чем значение дозового коэффициента для типа соединения F, рассчитанное по предыдущим моделям МКРЗ. Для триоксида урана (uranium trioxide UO_3), с учетом его перехода из типа соединения М в F/M, значение дозового коэффициента ожидаемой эффективной дозы по обновленной модели дыхательного тракта меньше соответствующего значения по предыдущей модели дыхательного тракта типа М в 4,7 раз ($1,8\text{E}-06 \div 3,8\text{E}-07$). Значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения М, рассчитанное по новым моделям, меньше в 1,4 раза ($1,8\text{E}-06 \div 1,3\text{E}-06$), чем то же значение, рассчитанное по предыдущим моделям МКРЗ. Значение ожидаемой эффективной дозы для типа соединения M/S (к которым по новой модели дыхательного тракта относят оксид U_3O_8 и диоксид урана UO_2), рассчитанное по новым моделям, в 1,2 раза ($6,1\text{E}-06 \div 5,1\text{E}-06$) меньше значения, рассчитанного по предыдущим моделям МКРЗ для соединений типа S (к которым по предыдущей модели дыхательного тракта относили U_3O_8 и UO_2). Из приведенных выше данных следует, что при переходе норм радиационной безопасности (НРБ) на новые модели МКРЗ различия в значениях дозовых коэффициентов приведут к изменению в соответствующей пропорции пределов годовых поступлений (ППП) для отмеченных выше типов соединений урана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. ICRP. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP. 2002;32;3-4.
2. ICRP. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP. 2006;36;1-2.
3. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP. 2007;37;2-4.
4. ICRP. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP. 2008;38;3.
5. ICRP. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP. 2009;39;2.
6. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015;44;2.
7. ICRP. The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults: specific absorbed fractions. ICRP Publication 133. Ann. ICRP. 2016;45;2:1-74.
8. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Ann. ICRP. 2016;45;3/4:1-352.
9. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP. 2017;46;3/4.
10. ICRP. Occupational Intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. Ann. ICRP. 2019;48;2/3.
11. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 5. ICRP Publication 151. Ann. ICRP. 2022;51;1-2.
12. ICRP. Occupational Intakes of radionuclides: Electronic Annex of ICRP Publications 130, 134, 137, 141, 151. 2022.

13. ICRP. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. 1991;21;1-3.
14. ICRP. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30. Part 1. Ann. ICRP. 1979;2;3-4.
15. ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994;24;1-3.
16. ICRP. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 2. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. Ann. ICRP. 1993;23;3-4.
17. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Гигиенические нормативы СП 2.6.1.2523-09. М. 2009. 100 с. [Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Hygienic Standards SP 2.6.1.2523-09. Moscow Publ., 2009. 100 p. (In Russ.)].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено по Федеральной Целевой Программе, шифр «Радиометрия-19».

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.07.2022. Принята к публикации: 25.09.2022.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study was carried out under the Federal Target Program, code "Radiometry-19".

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 20.07.2022. Accepted for publication: 25.09.2022.