

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

СРАВНЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ТОКСИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ УРАНА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА ПО НОВЫМ БИОКИНЕТИЧЕСКИМ МОДЕЛЯМ МКРЗ

Федеральный медицинский биофизический центр им. 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 сравнение радиационной и химической токсичности соединений урана, полученное на основе расчета уровней ингаляционного поступления и ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) в зависимости от типов соединений F, M, F/M и M/S в диапазоне медианного по активности аэродинамического диаметра (АМАД) от 0,3 до 20 мкм для смесей урана природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного (ВОУ), которые приводят к максимально допустимой концентрации урана в почках. Расчеты проведены по новым биокинетическим моделям МКРЗ, которые обладают более физиологически реалистичным описанием динамики удержания радионуклидов в органах и тканях, чем прежние версии моделей.

Результаты: Проведены расчеты динамики активности урана в почках при хроническом ингаляционном поступлении с постоянной скоростью в течение 50-летнего периода работы и при остром поступлении. Показано, что при хроническом поступлении скорость накопления урана в почках, выраженная в относительных единицах, не зависит от значений АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм и незначительно зависит от типов соединений при ингаляции F, F/M, M и M/S, к которым относят практически все химические соединения урана. При остром поступлении происходит быстрое, в течение 1–3 сут, увеличение содержания урана в почках до максимального значения и затем постепенное уменьшение до значения 20 % от максимального за 20–60 сут в зависимости от типа соединения урана F, M, F/M, M/S и практически независимо от АМАД в широком диапазоне значений от 0,3 до 20 мкм. Для сравнения радиационной и химической токсичности урана получены значения ОЭД, которая формируется за год при поступлении аэрозолей урана типов соединений F, M, F/M и M/S и значений АМАД от 0,3 до 20 мкм в количестве, создающем максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г при хроническом поступлении и 3 мкг/г при остром поступлении. Рассчитаны значения поступления урана за год в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана типов соединений F, M, F/M и M/S в диапазоне значений АМАД от 0,3 до 20 мкм, а также значения поступления урана в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 3 мкг/г при однократном ингаляционном поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S и АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм, независимо от радионуклидного состава урана.

Заключение: Показано, что химическая токсичность преобладает над радиационной для соединений урана типов F и F/M для всех смесей урана, кроме ВОУ, для соединения типа M – для смесей ПУ и ОУ, а для соединения типа M/S преобладает радиационная токсичность для всех рассмотренных смесей урана. При хроническом поступлении при значении ОЭД равном несколько мЗв в год, у персонала уже после 1–2 лет работы могут проявляться признаки химической токсичности урана при работе с соединениями F и F/M и смесями урана природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) урана. При остром поступлении для соединений F и F/M, а также частично M (для смесей ПУ, ОУ и НОУ) в качестве критерия для ограничения облучения должна быть принята химическая токсичность урана, что может существенно, в десятки и сотни раз, уменьшить уровень допустимого поступления урана.

Ключевые слова: уран, химическая токсичность урана, концентрация урана в почках, аэрозоли урана, типы соединений, биокинетическая модель, внутреннее облучение, ожидаемая эффективная доза, ингаляционное поступление, природный уран, обедненный уран, низкообогащенный уран, высокообогащенный уран, новые рекомендации МКРЗ

Для цитирования: Молоканов А.А., Поцяпун Н.П., Максимова Е.Ю., Квачева Ю.Е. Сравнение радиационной и химической токсичности соединений урана на основе расчета по новым биокинетическим моделям МКРЗ // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 6. С. 20–26. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-20-26

А.А. Molokanov, N.P. Potsyapun, E.Yu. Maksimova, Yu.E. Kvacheva

Comparison of Radiation and Chemical Toxicity of Uranium Compounds on The Basis of Calculation by New ICRP Biokinetic Models

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

Contact person: Andrei 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: The article presents a comparison of the radiation and chemical toxicity of uranium compounds, obtained on the basis of calculating the levels of inhalation intake and committed effective dose depending on the types of compounds F, M, F/M and M/S in the AMAD range from 0.3 to 20 μm for typical isotopic compositions of natural (NU), depleted (DU), low enriched (LEU) and highly enriched (HEU) uranium, which lead to the maximum permissible concentration of uranium in the kidneys. The calculations were carried out using new ICRP biokinetic models, which give more physiologically realistic representations of uptake and retention in organs and tissues, and excretion.

Results: The dynamics of uranium activity in the kidneys was calculated for constant chronic inhalation intake over a 50-year period and for acute intake. It was shown that in case of chronic intake, the rate of accumulation of uranium in the kidneys, expressed in relative units, does not depend on the AMAD in the range from 0.3 to 20 μm and slightly depends on the types of compounds F, F/M, M and M/S, which include almost all chemical compounds of uranium. In case of acute intake, there is a rapid, within 1–3 days, an increase of uranium in the kidneys to a maximum value and then a gradual decrease to a value of 20 % of the maximum value in 20–60 days, depending on the type of compound F, M, F/M, M/S and AMAD in a wide range of values from 0.3 to 20 μm . To compare the radiation and chemical toxicity of uranium, the values of the committed effective dose were calculated, which is formed after intake of uranium aerosols of the types F, M, F/M and M/S and AMADs from 0.3 to 20 μm in an amount that creates the maximum concentration of uranium in the kidneys 0.3 $\mu\text{g/g}$ for chronic intake and 3 $\mu\text{g/g}$ for acute intake. The values of uranium intake per year in milligrams, which form the maximum concentration of uranium in the kidneys of 0.3 $\mu\text{g/g}$, in case of constant chronic intake of uranium aerosols, as well as the values of uranium intake in milligrams, which form the maximum concentration of uranium in the kidneys of 3 $\mu\text{g/g}$ after a single intake of uranium aerosols in both case of the types F, M, F/M and M/S and AMAD in the range from 0.3 to 20 μm were calculated, which are evidently independent of the considered isotopic composition of the uranium.

Conclusion: It is shown that chemical toxicity prevails over radiation toxicity for the types of uranium compounds F and F/M for all considered uranium isotopic composition, except for HEU; for the type of compound M it is the same for mixtures of NU and DU, and for the type M/S radiation toxicity prevails for all considered uranium isotopic composition. In case of chronic intake at committed effective dose exposure rate of several mSv per year, workers can suffer from the chemical toxicity of uranium when working with F and F/M compounds and isotope compositions of natural (NU), depleted (DU) and low enriched (LEU) uranium already after 1–2 years of work. In case of acute intake, the chemical toxicity of uranium should be taken as a criterion for limiting exposure for compounds F and F/M, and also partially M (for uranium isotope compositions of NU, DU and LEU), which can significantly, by tens and hundreds of times, reduce the permissible limit of uranium intake.

Keywords: uranium, chemical toxicity, concentration in the kidneys, uranium aerosols, absorption types, biokinetic model, internal exposure, committed effective dose, inhalation intake, natural uranium, depleted uranium, low enriched uranium, highly enriched uranium, new ICRP recommendations

For citation: Molokanov AA, Potsyapun NP, Maksimova EYu, Kvacheva YuE. Comparison of Radiation and Chemical Toxicity of Uranium Compounds on The Basis of Calculation by New ICRP Biokinetic Models. Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68(6):20–26. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-6-20-26

Введение

При поступлении урана в организм человека, кроме радиационной токсичности, необходимо учитывать его химическую токсичность. Общепринятым считается, что максимально допустимая концентрация урана в почках составляет 3 мкг/г [1, 2] при том, что уровни урана в почках в течение длительных периодов времени, которые приводят к незначительной дисфункции почек у людей (измеряемой с помощью чувствительных биохимических тестов функции почек), точно не установлены. Но при этом они считаются по меньшей мере в десять раз меньшими, чем значение в три микрограмма урана на грамм почки, который часто используются в качестве основы для пределов профессионального облучения [3]. Согласно НРБ-99/2009, максимально допустимое ингаляционное поступление растворимых соединений урана для персонала при хроническом ингаляционном поступлении не должно превышать 500 мг/год [4]. Поскольку новые биокINETические модели МКРЗ являются более физиологически реалистичными по отношению к динамике удержания радионуклидов в органах и тканях [5], то представляет интерес использование этих моделей для расчета уровней поступления урана в разных условиях, которые приводят к максимально допустимой концентрации урана в почках, а также сравнение их с радиационными пределами поступления радионуклидов урана.

Расчет количества урана в единицах массы и в единицах активности

Количество урана в единицах активности и в единицах массы связано коэффициентами, представляющими собой удельную массу q_M и удельную активность q_A :

$$q_M = 10^3 \times M_A / (\lambda \times N_A), \text{ мг/Бк} \text{ и } q_A = 1 / q_M, \text{ Бк/мг} \quad (1)$$

где λ – постоянная распада ($\ln 2 / T_{1/2}$) в s^{-1} (31557600 секунд в году), $T_{1/2}$ – период полураспада, N_A – число Авогадро ($6,0221367 \times 10^{23}$) моль $^{-1}$, M_A – молярная масса нуклида (например, 234, 235, 238).

В табл. 1 приведены значения удельной массы и удельной активности радиоизотопов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U , входящих в состав природного урана и его смесей, рассчитанные по формулам (1). Данные о периодах полураспада радиоизотопов взяты из публикации 107 МКРЗ [6].

Таблица 1

Удельные активности и удельные массы радиоизотопов урана
Specific activities and specific masses of uranium radioisotopes

Радионуклид	Удельная масса, q_M , мг/Бк	Удельная активность, q_A , Бк/мг
U-234	4,343E-06	2,303E+05
U-235	1,251E-02	7,995E+01
U-238	8,039E-02	1,244E+01

В табл. 2 приведены типичные радиоизотопные составы природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного (ВОУ) урана в процентах по массе и по альфа-активности, взятые из стандарта ИСО [1], а также значения общей удельной активности и удельной массы смесей урана, рассчитанные с использованием данных по удельной активности и удельной массе радиоизотопов урана, приведенных в табл. 1. Значения общей удельной массы смесей урана позволяют рассчитать количество урана в почках в миллиграммах по величине его активности в почках в Бк, полученной в результате расчета с использованием биокINETических моделей МКРЗ, описывающих транзит радиоизотопов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U в организме человека при их ингаляционном пероральном и раневом поступлении.

Общая удельная активность и общая удельная масса смесей урана рассчитаны по формулам:

$$Q_{Ai} = \sum_j n_{Mj} \times q_{Aj}, \text{ Бк/мг} \text{ и } Q_{Mi} = \sum_j n_{Aj} \times q_{Mj}, \text{ мг/Бк} \quad (2)$$

где Q_{Ai} и Q_{Mi} – общая удельная активность и общая удельная масса смеси урана i (ПУ, ОУ, НОУ и ВОУ); n_{Mj} – массовая доля радиоизотопа j в отн. ед., n_{Aj} – доля радиоизотопа j по активности в отн. ед. ($n = N/100$, N – % по массе), представленные в табл. 2; q_{Aj} и q_{Mj} – значения

Таблица 2

Типичные радиоизотопные составы по массе и общей удельной альфа-активности для природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного (ВОУ) урана

Typical radioisotope compositions by mass and total specific alpha activity for natural (NU), depleted (DU), low enriched (LEU) and highly enriched (HEU) uranium

Смесь урана	U-238		U-235		U-234		Общая удельная активность, Бк/мг	Общая удельная масса, мг/Бк
	% по массе	% по активности	% по массе	% по активности	% по массе	% по активности		
ПУ	99,275	48,26	0,72	2,25	0,0055	49,49	2,56E+01	3,91E-02
ОУ	99,799	83,45	0,2	1,07	0,0010	15,48	1,49E+01	6,72E-02
НОУ	96,471	14,78	3,5	3,45	0,02884	81,78	8,12E+01	1,23E-02
ВОУ	6,41	0,042	92,8	3,92	0,79	96,04	1,89E+03	5,28E-04

удельной активности и удельной массы радиоизотопа j (^{234}U , ^{235}U и ^{238}U), приведенные в табл. 1.

Расчет и сравнение радиационной и химической токсичности соединений урана

Новые биокинетические модели МКРЗ позволяют связать уровень поступления урана в условиях ингаляционного, перорального и раневого поступления с концентрацией урана в почках, или наоборот, определить концентрации урана в почках при уровне поступления урана, соответствующему определенному уровню дозы и сравнить радиационную и химическую токсичность урана путем сопоставления уровня поступления урана, приводящего к максимально допустимой концентрации урана в почках, с пределом дозы при том же поступлении или концентрацию урана в почках, образуемому при уровне поступления урана, соответствующему пределу дозы. Учитывая, что для радиоизотопов урана параметры биокинетической модели одинаковы, а период полураспада радиоизотопов ^{234}U , ^{235}U и ^{238}U много больше рассматриваемого периода времени интегрирования ожидаемой эффективной дозы (ОЭД), равного 50 лет, результаты расчета активности радионуклидов в органах и тканях и продуктах выведения также будут одинаковыми для этих радиоизотопов. При этом количество урана в почках, выраженное в миллиграммах, для ПУ, ОУ, НОУ и ВОУ будет разным, в зависимости от величины их общей удельной массы, приведенной в табл. 2.

Ингаляционное поступление радиоизотопов урана

При ингаляционном поступлении для расчета биокинетики радионуклидов в организме человека в соответствии с новыми рекомендациями МКРЗ используется обновленная модель дыхательного тракта [5], сопряженная с системной биокинетической моделью урана [7] и с новой моделью пищеварительного тракта [8]. Согласно обновленной модели дыхательного тракта, соединения урана, наряду со стандартными соединениями типов F, M, S предыдущей модели [9], имеют дополнительные типы соединений F/M и M/S. Кроме них, рассматривается как отдельный тип соединения алюминид урана (uranium aluminide, UAl_x). К соединениям F по обновленной модели дыхательного тракта относят гексафторид урана (uranium hexafluoride, UF_6) и уранилтрибутилфосфат (uranyl tri-butyl-phosphate), а к соединениям F/M относят нитрат уранила (uranyl nitrate $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$), гидрат перекиси урана (uranium peroxide hydrate UO_4), диуранат аммония (ammonium diuranate ADU) и триоксид урана (uranium trioxide UO_3); к типу соединений M 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 соединениям типа 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 [9], и к нему не относят ни одно из известных соединений урана [7]. В обновленной модели дыхательного тракта рассматривается широкий диапазон значений размеров частиц аэрозолей со средними размерами в диапазоне от АМТД=0,001 мкм до АМАД=20 мкм. Для ингаляционного поступления аэрозолей, образованных путем десинтеграции радиоактивного материала, находящегося в твердом состоянии, значение медианного по активности аэродинамического диаметра (АМАД) в нормальных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения по умолчанию принимают равным 5 мкм [5].

Хроническое поступление

В качестве простейшей модели хронического ингаляционного поступления обычно рассматривают последовательность ежедневных ингаляционных поступлений с постоянной скоростью в течение всего периода работы (максимально 50 лет). Реальное ингаляционное хроническое поступление отличается от модельного и нерегулярностью поступлений, и непостоянством скорости поступления. Но если суммарное поступление за календарный год, которое нормируется, при реальном хроническом поступлении какого-либо радионуклида равно той же величине, что при модельном хроническом поступлении данного радионуклида с постоянной скоростью, то все характеристики биокинетики (значения активности радионуклида в органах, тканях и продуктах выведения) при реальном хроническом поступлении будут колебаться вокруг значений тех же характеристик, рассчитанных при модельном хроническом поступлении радионуклида с постоянной скоростью. Таким образом, использование модельного хронического ингаляционного поступления радионуклида позволяет определить средний уровень его активности в органах, тканях и продуктах выведения в течение календарного года. При этом в течение календарного года при реальном хроническом поступлении радионуклидов урана будут наблюдаться пики активности урана в органах, в частности в почках, но величина этих пиков не может быть существенно больше среднего значения, иначе такое поступление необходимо будет отнести к острому поступлению, которое будет рассмотрено далее.

При хроническом ингаляционном поступлении с постоянной скоростью в течение 50-летнего периода работы происходит накопление урана в почках. Скорость накопления, выраженная в относительных единицах, не зависит от значений АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм и незначительно зависит от типа соединений при ингаляции F, F/M, M и M/S, к которым относят практически все химические соединения урана, рис 1. Во всех случа-

ях максимальное значение концентрации урана в почках достигается к концу всего периода работы. Однако уже после 1–2 лет работы накопление урана достигает 50 % от максимального значения для тех соединений урана (F, F/M и M), для которых, как будет показано далее, химическая токсичность преобладает над радиационной.

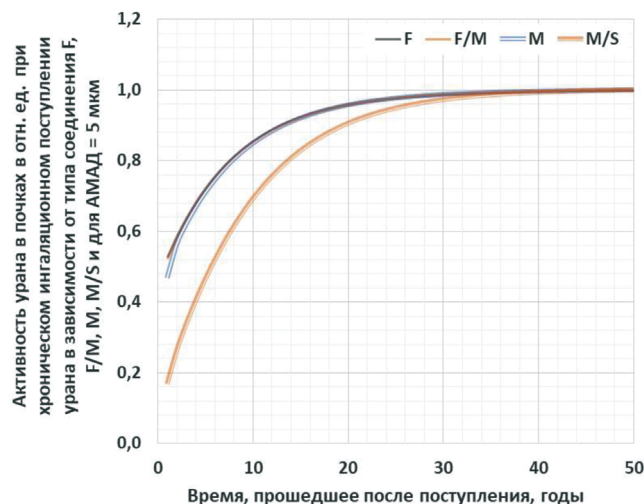


Рис. 1. Активность урана в почках взрослого человека, выраженная в относительных единицах, при хроническом ингаляционном поступлении урана в зависимости от типа соединения F, F/M, M, M/S и для значения АМАД = 5 мкм

Fig. 1. Activity of uranium in the kidneys of an adult, expressed in relative units, during chronic inhalation intake of uranium, depending on the types of compound F, F/M, M, M/S and for АМАД = 5 μ m

В табл. 3 показаны значения поступления урана за год в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S в широком диапазоне значений АМАД от 0,3 до 20 мкм. Эти значения, очевидно, не зависят от того, какая смесь урана рассматривается, но существенно зависят от степени растворимости соединений урана. Принятое для сравнения радиационной и химической токсичности урана значение 0,3 мкг/г почки, в соответствии с работой [3] с учетом хронического воздействия урана в течение длительного периода времени, на порядок меньше того значения, которое принято в качестве максимально допустимой концентрации урана в почках, равной 3 мкг/г. Для расчета концентрации урана в почках принята масса почек взрослого человека, равная 310 грамм [10].

Таблица 3

Значения поступления урана за год в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S в диапазоне значений АМАД от 0,3 до 20 мкм

Uranium intake per year in milligrams, which form the maximum concentration of uranium in the kidneys of 0.3 μ g/g during a constant chronic intake of uranium aerosols of the types F, M, F/M and M/S in the range of АМАД values from 0.3 to 20 μ m

Тип соединения	АМАД			
	0,3	1	5	20
F	53	63	73	143
F/M	61	83	135	457
M	80	110	194	828
M/S	152	210	406	2409

Очевидно, что если в качестве порогового значения химической токсичности урана принять равной максимально допустимой концентрации урана в почках, равной 3 мкг/г, то значения поступления урана за год в миллиграммах, приведенные в табл. 3, увеличатся в 10 раз. Так, для растворимого соединения урана типа F и АМАД=1 мкм, максимально допустимое значение поступления урана за год будет равно 630 мг, что сравнимо со значением максимально допустимого ингаляционного поступления растворимых соединений урана для персонала 500 мг в год, приведенным в НРБ-99/2009 [4]. Однако, из табл. 3 видно, что значения максимально допустимого ингаляционного поступления урана существенно зависят как от типа соединения при ингаляции, так и от значения АМАД.

Для сравнения радиационной и химической токсичности урана в табл. 4 показаны значения ожидаемой эффективной дозы (ОЭД), которая формируется за год при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S и АМАД=5 мкм в количестве, создающем максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г.

Таблица 4

Значения ОЭД в мЗв для смесей природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного (ВОУ) урана, соответствующие максимальной концентрации урана в почках 0,3 мкг/г, образующейся за период работы 50 лет при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S и значения АМАД=5 мкм

СED in mSv values for mixtures of natural (NU), depleted (DU), low enriched (LEU) and highly enriched (HEU) uranium, corresponding to the maximum concentration of uranium in the kidneys of 0.3 μ g/g, formed over a period of 50 years during a constant chronic intake of uranium aerosols types F, M, F/M and M/S and АМАД=5 μ m

Смесь урана	Тип соединения			
	F	F/M	M	M/S
ПУ	0,44	1,3	6,5	53
ОУ	0,24	0,74	3,6	30
НОУ	1,5	4,4	21,6	178
ВОУ	35	105	514	4213

По данным табл. 4 видно, что радиационная составляющая преобладает над химической для соединения типа M/S для всех рассмотренных смесей урана, для соединения типа M — для смесей НОУ и ВОУ, для соединений урана типов F и F/M — для смеси ВОУ (отмечены жирным шрифтом). Другими словами, для перечисленных случаев, если ОЭД не превышает 20 мЗв в год, то концентрация урана в почках не превысит значения 0,3 мкг/г и химическую токсичность урана можно не учитывать. В остальных случаях необходимо устанавливать пределы ингаляционного поступления урана с учетом его химической токсичности, иначе, как видно из табл. 4, уже при ОЭД, равной несколько мЗв в год, у персонала уже в первые годы работы (см. рис. 1) могут проявляться признаки химической токсичности урана. В особенности это касается соединений F и F/M для всех смесей урана, кроме ВОУ.

Для других значений АМАД аналогичные расчетные значения ОЭД будут незначительно отличаться, поэтому вывод о соотношении радиационной и химической токсичности урана, сделанный выше, не изменится. Так, отношения ОЭД для заданного АМАД к ОЭД представленным в табл. 4 для АМАД = 5 мкм для смесей ПУ, ОУ, НОУ и ВОУ практически одинаковы (для заданной смеси максимальное расхож-

дение со средним значением по смеси равно 2,6 %). В табл. 5, представлены средние по смеси урана значения отношений ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в табл. 4 для АМАД = 5 мкм.

Таблица 5

Значения отношения ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в таблице 4 для АМАД = 5 мкм

The ratios of CED for a given AMAD in the range from 0.3 to 20 μm to the CED presented in Table 4 for AMAD = 5 μm

АМАД	Тип соединения			
	F	F/M	M	M/S
0,3	1,04	1,03	0,92	0,75
1	1,02	0,95	0,89	0,80
5	1,00	1,00	1,00	1,00
20	1,00	0,97	1,37	2,03

Как видно из табл. 5, отношения ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в табл. 4 для АМАД = 5 мкм, практически не зависят от АМАД в широком диапазоне от 0,3 до 20 мкм, в особенности для тех растворимых соединений типов F и F/M, для которых химическая токсичность урана преобладает над радиационной токсичностью для всех его смесей кроме ВОУ (табл. 4).

Острое поступление

Острое ингаляционное поступление отличается от хронического тем, что оно существенно выше уровня ежедневного хронического поступления, то есть составляет существенную долю поступления за год, которое формируется в результате хронического поступления в нормальных условиях работы. Его можно рассматривать как значимое, если оно составляет значимую долю предела дозы, составляющего 20 мЗв в год, за отдельный год, при этом допускается максимальное значение 50 мЗв в год с условием, что среднее годовое значение за любые последовательные 5 лет не превысит 20 мЗв. Острое поступление обычно происходит за короткий по сравнению с годом промежуток времени и в качестве простой модели острого ингаляционного поступления можно рассмотреть однократное ингаляционное поступление, произошедшее мгновенно, практически за несколько часов. В этом случае происходит быстрое, в течение 1–3 сут увеличение концентрации урана в почках до максимального значения и затем постепенное уменьшение концентрации урана до значения 20 % от максимального за 20–60 сут в зависимости от типа соединения урана F, M, F/M, M/S и практически независимо от АМАД в широком диапазоне значений от 0,3 до 20 мкм, как показано на рис. 2 (для значения АМАД = 5 мкм).

Поскольку при остром ингаляционном поступлении урана происходит кратковременное увеличение концентрации урана в почках, то в качестве граничной величины для сравнения радиационной и химической токсичности урана логичнее взять значение максимально допустимой концентрации урана в почках, равное 3 мкг/г. В табл. 6 показаны значения поступления урана в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 3 мкг/г при однократном ингаляционном поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M, M/S и АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм, независимо от смеси природного, обедненного, низкообогащенного или высокообогащенного урана.

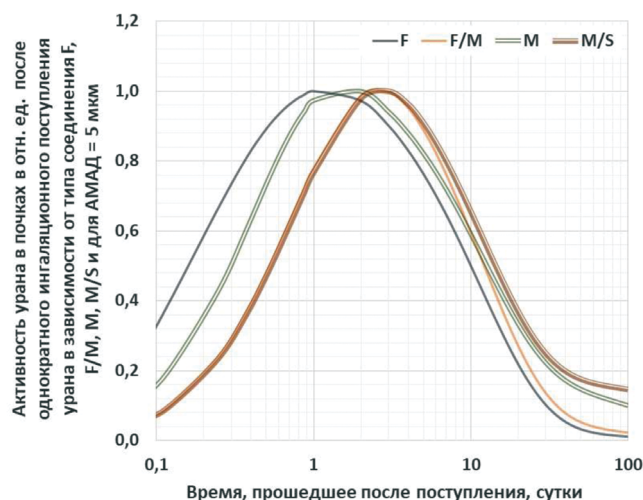


Рис. 2. Динамика активности урана в почках в отн. ед. после однократного ингаляционного поступления урана в зависимости от типов соединения F, F/M, M, M/S для значения АМАД = 5 мкм

Fig. 2. Dynamics of uranium activity in the kidneys in rel. units after a single inhalation intake of uranium, depending on the types of compound F, F/M, M, M/S for the value of AMAD = 5 μm

Таблица 6

Значения поступления урана в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 3 мкг/г при однократном ингаляционном поступлении аэрозолей урана типов соединений F, M, F/M и M/S и АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм

Uranium intake in milligrams, which form the maximum concentration of uranium in the kidneys of 3 $\mu\text{g/g}$ after a single inhalation intake of uranium aerosols of the types F, M, F/M and M/S and AMAD in the range from 0.3 to 20 μm

Тип соединения	АМАД			
	0,3	1	5	20
F	43	52	62	124
F/M	67	91	144	439
M	230	302	437	1158
M/S	1715	2331	3700	11493

По данным табл. 6 видно, например, что для растворимых соединений типа F ингаляционное поступление урана на уровне 43–124 мг, в зависимости от АМАД, формирует кратковременно в течение 1–3 сут максимально допустимую концентрацию урана в почках, равную 3 мкг/г.

По аналогии со случаем хронического поступления, представленным выше, в табл. 7 для сравнения радиационной и химической токсичности урана показаны значения ОЭД, которая формируется при остром поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S и значения АМАД=5 мкм в количестве, создающем максимальную концентрацию урана в почках 3 мкг/г.

По данным табл. 7 видно, что радиационная составляющая так же, как и в случае хронического поступления (табл. 4), преобладает для соединения типа M/S для всех рассмотренных смесей урана, для соединения типа M – для смесей НОУ и ВОУ, для соединений урана типов F и F/M – для смеси ВОУ (отмечены жирным шрифтом). Если исходить из того, что при остром поступлении допустимый предел ОЭД может достигать 200 мЗв (при планируемом повышенном облучении), то в особенности для соединений F и F/M, а также частично M (для смесей ПУ, ОУ и НОУ) в качестве критерия для ограничения облучения должна быть принята химическая токсичность урана, что может су-

Таблица 7

Значения ОЭД в мЗв для смесей природного (ПУ), обедненного (ОУ), низкообогащенного (НОУ) и высокообогащенного (ВОУ) урана, соответствующие максимальной концентрации урана в почках 3 мкг/г, образующейся при однократном ингаляционном поступлении аэрозолей урана типов соединений F, M, F/M и M/S и значения АМАД=5 мкм

CED in mSv values for mixtures of natural (NU), depleted (DU), low enriched (LEU) and highly enriched (HEU) uranium, corresponding to the maximum concentration of uranium in the kidneys of 3 µg/g, formed after a single inhalation intake of uranium aerosols types F, M, F/M and M/S and AMAD=5 µm

Смесь урана	Тип соединения			
	F	F/M	M	M/S
ПУ	0,37	1,42	14,5	488
ОУ	0,21	0,79	8,01	270
НОУ	1,2	4,7	48,6	1619
ВОУ	29	111	1155	38430

шественно, в десятки и сотни раз, уменьшить уровень допустимого поступления урана.

Для других значений АМАД отношения ОЭД для заданного АМАД к ОЭД, представленным в табл. 7 для АМАД = 5 мкм, также несильно отличаются для смесей ПУ, ОУ, НОУ и ВОУ (для заданной смеси максимальное расхождение со средним значением по смеси равно 3,1 %). В табл. 8 представлены средние по смеси урана значения отношений ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в табл. 7 для АМАД = 5 мкм.

Таблица 8

Значения отношения ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в табл. 7 для АМАД = 5 мкм

The ratios of CED for a given AMAD in the range from 0.3 to 20 µm to the CED presented in Table 7 for AMAD = 5 µm

АМАД	Тип соединения			
	F	F/M	M	M/S
0,3	0,99	1,07	1,17	0,93
1	0,99	1,01	1,09	0,97
5	1,0	1,0	1,0	1,0
20	1,03	0,88	0,86	1,06

Как видно из табл. 8, отношения ОЭД для заданного АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм к ОЭД, представленным в таблице 7 для АМАД = 5 мкм, практически не зависят от АМАД в широком диапазоне от 0,3 до 20 мкм, и для всех типов соединений F, M, F/M и M/S, таким образом, выводы, сделанные выше о соотношении радиационной и химической токсичности урана для всех рассмотренных типов соединений, остаются верными для всех значений АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм.

Заключение

Проведено сравнение радиационной и химической токсичности соединений урана на основе расчета уровней ингаляционного поступления и ОЭД в зависимости от типов соединений F, M, F/M и M/S в диапазоне АМАД от 0,3 до 20 мкм для смесей ПУ, ОУ, НОУ и ВОУ, которые приводят к максимально допустимой концентрации урана в почках. Расчеты проведены по новым биокинетическим моделям МКРЗ, которые обладают более физиологически реалистичным описанием динамики удержания радионуклидов в органах и тканях и их выведения из организма [5]. С учетом того, что в случае хронического поступления происходит длительное воздействие урана на почки, в качестве граничного

значения допустимой концентрации урана в почках в расчетах принято 0,3 мкг/г почки в соответствии с данными работы [3].

Расчеты показали, что при хроническом ингаляционном поступлении урана с постоянной скоростью:

- происходит монотонное накопление урана в почках, максимальное значение которого достигается в конце в 50-летнего периода работы. Но уже после 1–2 лет работы для соединений урана F, F/M и M накопление урана достигает 50 % от максимального значения;
- химическая токсичность преобладает над радиационной токсичностью для соединений урана типов F и F/M для всех смесей урана, кроме ВОУ, для типа соединения M – для смесей ПУ и ОУ, а для типа соединения M/S преобладает радиационная токсичность для всех рассмотренных смесей урана;
- при значении ОЭД, равном несколько мЗв в год, у персонала уже в первые годы работы могут проявляться признаки химической токсичности урана при работе с соединениями F и F/M и смесями ПУ, ОУ, НОУ;
- значения поступления урана за год в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 0,3 мкг/г, при равномерном хроническом поступлении аэрозолей урана соединений типов F, M, F/M и M/S в диапазоне значений АМАД от 0,3 до 20 мкм для любого радионуклидного состава представлены в табл. 3.

Поскольку при остром ингаляционном поступлении урана происходит кратковременное увеличение концентрации урана в почках, то в качестве граничной величины для сравнения радиационной и химической токсичности урана в расчетах принято значение максимально допустимой концентрации урана в почках, равное 3 мкг/г.

Расчеты показали, что в случае острого ингаляционного поступления урана:

- происходит быстрое, в течение 1–3 сут увеличение концентрации урана в почках до максимального значения и затем постепенное уменьшение до значения 20 % от максимального за 20–60 сут в зависимости от типа соединения урана F, M, F/M, M/S и АМАД в широком диапазоне значений от 0,3 до 20 мкм;
- химическая токсичность преобладает над радиационной для соединений урана типов F и F/M для всех смесей урана, кроме ВОУ, для соединения типа M – для смесей ПУ и ОУ, а для соединения типа M/S преобладает радиационная токсичность для всех рассмотренных смесей урана;
- с учетом того, что при остром поступлении допустимый предел ОЭД может достигать 200 мЗв (при планируемом повышенном облучении), то для соединений F и F/M, а также частично M (для смесей ПУ, ОУ и НОУ) в качестве критерия для ограничения облучения в этом случае должна быть принята химическая токсичность урана, что может существенно, в десятки и сотни раз, уменьшить уровень допустимого поступления урана;
- значения поступления урана в миллиграммах, которые формируют максимальную концентрацию урана в почках 3 мкг/г при однократном ингаляционном поступлении аэрозолей урана типов соединений F, M, F/M и M/S и АМАД в диапазоне от 0,3 до 20 мкм для любого радионуклидного состава представлены в табл. 6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Radiological Protection – Monitoring and Internal Dosimetry for Specific Materials. Part 1. Uranium. ISO 16638-1:2015 (E).
2. Stradling N., Hodgson A., Ansoborlo E., Berard P., Etherington G., Fell T., LeGuen B. Anomalies between Radiological and Chemical Limits for Uranium after Inhalation by Workers and the Public. Radiation Protection Dosimetry. 2003. V.105, No. 1–4. P. 175–178.
3. The Royal Society. The Health Effects of Depleted Uranium Munitions: Summary. Document 6/02. March 2002. ISBN 0 85403 5753.
4. 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.)].
5. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP. 2015;44;2.
6. ICRP. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP. 2008;38;3.
7. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP. 2017;46;3/4.
8. ICRP. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP. 2006;36;1-2.
9. ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994;24;1-3.
10. ICRP. Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection Reference Values. ICRP Publication 89. Ann. ICRP. 2002;32;3-4.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.07.2023. Принята к публикации: 27.08.2023.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 20.07.2023. Accepted for publication: 27.08.2023.