

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

УДК: 51-74; 51-76; 614.876; 614.878

Бабенко С.П.<sup>1</sup>, Бадьин А.В.<sup>2</sup>, Овчинников А.В.<sup>2</sup>**О ВОЗМОЖНОСТИ УСКОРЕННОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ЛЮДЯМ ПОСЛЕ ОДНОКРАТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА**<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», 105005, Москва;<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», 119991, Москва

**Введение.** При аварийном выбросе гексафторида урана (ГФУ) в воздухе рабочего помещения появляются продукты его гидролиза, в состав которых входят токсичные вещества (уран и фтор). Продукты гидролиза ГФУ проникают в организм человека и оказывают на него негативное воздействие. Величина и скорость воздействия определяются количествами депонированных токсичных веществ. Известные методы определения этих количеств основаны на исследовании биологических сред пострадавших (моча, кровь, посмертно все органы), требующем затраты времени, порой критичного для сохранения жизни человека.

**Материал и методы.** В настоящей работе предлагается теоретический метод определения количества депонированных токсичных веществ. Расчёт проводится на основе моделей, построенных авторами настоящей статьи. Описаны последовательно: загрязнение рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ, поступление токсичных веществ в организм человека, прохождение урана и фтора через организм. Первая модель учитывает гидролиз, образование аэрозольных частиц, оседание молекул газов на стены рабочего помещения и на кожу человека, оседание аэрозольных частиц на пол рабочего помещения. С помощью уравнений непрерывности, записанных для концентраций молекул интересующих нас веществ, получены аналитические выражения для:  $n(z,t)$  – концентрация атомов токсичного вещества на высоте  $z$  в момент времени  $t$ ;  $j(t)$  – плотность потока числа атомов токсичного вещества на поверхности кожи в момент времени  $t$ . Вторая и третья модели описывают перкутанное и ингаляционное поступления урана и фтора в организм человека в составе продуктов гидролиза ГФУ, а также прохождение токсичных веществ через организм.

**Результаты.** Приведены результаты расчёта количеств депонированных в организме урана и фтора в различные моменты времени.

**Обсуждение.** Проведено сравнение этих величин с экспериментальными литературными данными по количеству урана и фтора, которые, попадая в организм, вызывают различные функциональные и органические изменения.

**Заключение.** Сделан вывод, что теоретический метод определения уровня поражения человека позволяет без его предварительного длительного обследования прогнозировать развитие негативного воздействия урана и фтора и выбирать самые эффективные методы оказания медицинской помощи.

Ключевые слова: уран; фтор; гексафторид урана; математическая модель; ингаляционное поступление; перкутанное поступление.

**Для цитирования:** Бабенко С.П., Бадьин А.В., Овчинников А.В. О возможности ускоренной медицинской помощи людям после однократного воздействия на них гексафторида урана. *Гигиена и санитария*. 2018; 97(3): 213-219. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219>

**Для корреспонденции:** Бадьин Андрей Валентинович, канд. физ.-мат. наук, доцент МГУ, физический факультет, кафедра математики. E-mail: [badyin@phys.msu.ru](mailto:badyin@phys.msu.ru)

Babenko S.P.<sup>1</sup>, Badyin A.V.<sup>2</sup>, Ovchinnikov A.V.<sup>2</sup>**ON THE POSSIBILITY OF THE RAPID ASSISTANCE TO PEOPLE AFTER A SINGLE EXPOSURE TO URANIUM HEXAFLUORIDE**<sup>1</sup>N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation;<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

**Introduction.** The accidental release of uranium hexafluoride (UHF) is associated with the pollution of the air of the working premises with its hydrolysis products, containing toxic substances (uranium and fluorine). The intake of UHF hydrolysis products by is related to a negative impact on the human body. The magnitude and the rate of the exposure are determined by the amount of deposited toxic substances. Known methods for the determination of these amounts are based on the study of involved biological media (urine, blood, postmortem examination of all organs), requiring time-consuming, sometimes are critical for the preservation of the human life. In this paper, we propose a theoretical method for the detecting the amount of the deposited toxic substances. The calculation is based on models constructed by authors of this article. They describe successively: pollution of the working premises with UHF hydrolysis products, the input of toxic substances in the human body, uranium and passing fluorine through the body. The first model includes the following processes: hydrolysis, the formation of aerosol particles as on the deposition gas molecules and the wall of working space as on the human skin, deposition of the aerosol particles on the floor of the working space. With continuity equations written for the concentrations of molecules of substances of interest to us, the analytical expressions for  $n(z,t)$  – the concentration of atoms of a toxic substance at the height  $z$  at the time  $t$ ;  $j(t)$  – flux density of toxic substance atoms on the surface of the skin at the time  $t$ . The second and third models describe percutaneous intake and inhalation of uranium and fluorine consisting of UHF hydrolysis products entering the human body, as well as toxic substances passed through the body.

**Results.** There are presented results of calculating the amounts deposited in the body of uranium fluoride at various time points. There is given a comparison of these values with the experimental data in the literature on the quantity of uranium and fluorine, which enters the body to cause various organic and functional changes.

**Conclusion.** The theoretical method of determining a person's level of the destruction was concluded to allow extending the prediction of the development of adverse effects of uranium and fluorine without its prior survey, and choose the most effective methods of healthcare provision.

**Key words:** uranium; fluorine; uranium hexafluoride; mathematical model; inhalation; percutaneous entry.

**For citation:** Babenko S.P., Badyin A.V., Ovchinnikov A.V. On the possibility of the rapid assistance to people after a single exposure to uranium hexafluoride. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)* 2018; 97(3): 213-219. (In Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2018-97-3-213-219>

**For correspondence:** Andrey V. Badyin, MD, Ph.D., Associate Professor of the Department of Physics of the M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation. E-mail: [badyin@phys.msu.ru](mailto:badyin@phys.msu.ru)

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

**Acknowledgment.** The study had no sponsorship.

Received: 15 January 2017

Accepted: 18 October 2017

## Введение

Газообразный гексафторид урана (ГФУ,  $UF_6$ ) используется при обогащении природного урана изотопом  $^{235}U$  [1]. В воздухе ГФУ быстро гидролизуеться и образует совокупность газов и аэрозолей:  $UF_6$  (газ),  $UOF_4$  (газ),  $UO_2F_2$  (газ),  $HF$  (газ),  $UO_2F_2$  (аэрозоль),  $HF$  (аэрозоль) [2]. Известно, что продукты гидролиза гексафторида урана, попадая в организм человека, могут нанести ему большой вред [3, 4]. Непосредственную опасность представляют атомы урана и фтора, входящие в состав молекул продуктов гидролиза ГФУ. Уран и фтор проникают в организмы людей, работающих на производстве [5, 6], и накапливаются там, оказывая как негативное химическое, так и негативное радиационное воздействие.

Совершенствование технологий (с улучшением условий труда), перевод работников (по клиническим показаниям) в более благоприятные условия предотвращают нарастание изменений в критических органах и развитие профессиональных заболеваний. Однако эти меры не помогают в борьбе с последствиями аварийных ситуаций. Бесспорно, что оказать помощь людям, побывавшим в аварийной ситуации, будет тем проще, чем больше медицинские работники будут знать о характере воздействия урана и фтора на организм человека. Поэтому, начиная с первых случаев отравления ГФУ при авариях на заводах Манхэттенского проекта [7] и по настоящее время как в США, так и в нашей стране постоянно накапливаются статистические данные по воздействию ГФУ на человека [4, 8]. Большую роль в изучении воздействия ГФУ на живые организмы сыграли опыты на животных [9].

При обследовании людей, побывавших в аварийных ситуациях, проводились лабораторно-инструментальные, рентгенологические, эндоскопические и биофизические исследования [8, 10]. В биологических средах (моча, кровь, посмертно все органы) определялось содержание урана и фтора и их динамика. Такой подход требует затраты времени, которое может оказаться критичным для облегчения состояния и сохранения жизни пострадавшего. В настоящей работе говорится о возможности использования методов математического моделирования для определения поступления урана и фтора в организм человека. Теоретические данные в сочетании с медицинскими показаниями относительно связи между поступлением токсичных веществ и клиническим состоянием человека должны сократить время на оценку ситуации и выбор правильного медицинского воздействия.

## Материал и методы

В настоящей статье исследование воздействия ГФУ на человека проводится на основе методов математического моделирования. При этом используются теоретические модели, построенные ранее авторами настоящей статьи. Они описывают последовательно: загрязнение рабочего помещения продуктами гидролиза гексафторида урана, поступление токсичных веществ (урана и фтора) в организм человека, прохождение токсичных веществ через организм.

Первая модель [11] описывает загрязнение воздуха рабочего помещения продуктами гидролиза ГФУ в составе газов и полидисперсных аэрозолей. При этом учитываются следующие физические и химические процессы: гидролиз  $UF_6$  (газ),  $UOF_4$  (газ) (взаимодействие с парами  $H_2O$ ), нуклеация  $UO_2F_2$  (газ),  $HF$  (газ) (образование аэрозольных частиц), оседание молекул газов на стены рабочего помещения и на кожу человека за счёт диффузии, оседание аэрозольных частиц на пол рабочего помещения под действием силы тяжести и силы сопротивления среды. В основе первой модели лежит начально-краевая задача для уравнений непрерывности, записанных для концентраций молекул интересующих нас веществ в составе газов и для удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей.

Наиболее общие уравнения для газов имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} n_k(\vec{x}, t) = D_k \Delta_{\vec{x}} n_k(\vec{x}, t) - (\vec{v}_k, \text{grad}_{\vec{x}} n_k(\vec{x}, t)) + \sum_{m=1}^N a_{k,m} n_m(\vec{x}, t) + F_k(\vec{x}, t),$$

$$k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q, \quad t \in (t_0, +\infty),$$

где  $N$  – число интересующих нас веществ в составе газов;  $Q$  – некоторое открытое непустое множество в пространстве  $\mathbb{R}^3$ ;  $t_0$  – «начальный» момент времени;  $n_k(\vec{x}, t)$  – концентрация молекул вещества с номером  $k$  в точке  $\vec{x}$  (здесь  $\vec{x} = (x, y, z)^T$ ) в момент времени  $t$ ;  $D_k$  – коэффициент диффузии молекул вещества с номером  $k$ ;  $\vec{v}_k$  – скорость дрейфа молекул вещества с номером  $k$ ;  $\{a_{k,m}\}_{k,m=\overline{1,N}}$  – постоянные, описывающие процессы гидролиза, нуклеации и воздухообмена;  $F_k(\vec{x}, t)$  – плотность мощности внешних источников молекул вещества с номером  $k$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t$ . Для однозначного определения концентраций молекул интересующих нас веществ в составе газов заданы следующие дополнительные условия:

$$n_k(\vec{x}, t_0) = n_{k,0}(\vec{x}), \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in Q;$$

$$\alpha_k(\vec{x}, t) \left( \frac{\partial}{\partial n} \right) n_k(\vec{x}, t) + \beta_k(\vec{x}, t) n_k(\vec{x}, t) = R_k(\vec{x}, t), \quad k = \overline{1, N}, \quad \vec{x} \in \partial Q, \quad t \in (t_0, +\infty),$$

где  $n_{k,0}(\vec{x})$  – концентрация молекул вещества с номером  $k$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t_0$ ;  $\vec{n}$  – единичная нормаль к поверхности  $\partial Q$ , внешняя по отношению к области  $Q$ ;  $\alpha_k, \beta_k, R_k$  – некоторые коэффициенты (см. ниже). Первая строка записанной формулы представляет собой начальное условие. Вторая строка записанной формулы представляет собой крайнее условие третьего рода. Если  $R_k = 0$ , то это условие отражает тот факт, что на границе области  $Q$  одна часть молекул вещества с номером  $k$  поглощается, а другая часть отражается. Если  $R_k \neq 0$ , то это условие описывает поступление молекул вещества с номером  $k$  внутрь области через ее границу. Коэффициенты  $\alpha_k, \beta_k$  удовлетворяют условиям:  $|\alpha_k| + |\beta_k| \neq 0$ ,  $\alpha_k \beta_k \geq 0$  (эти условия связаны с теоремой о единственности решения). Если область  $Q$  не является ограниченной, то в список дополнительных условий нужно включить условие регулярности решения на бесконечности.

Наиболее общее уравнение для аэрозолей имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} n'(r, \vec{x}, t) = D(r) \Delta_{\vec{x}} n'(r, \vec{x}, t) - (\vec{v}(r), \text{grad}_{\vec{x}} n'(r, \vec{x}, t)) - Kn'(r, \vec{x}, t) + g_0(r) \sum_{m=1}^N b_m n_m(\vec{x}, t) + F'(r, \vec{x}, t), \quad \vec{x} \in Q, t \in (t_0, +\infty),$$

где  $r$  – радиус аэрозольных частиц (величина  $r$  входит в рассматриваемое уравнение как параметр);  $n'(r, \vec{x}, t)$  – удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса  $r$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t$ ;  $D(r)$  – коэффициент диффузии аэрозольных частиц радиуса  $r$ ;  $\vec{v}(r)$  – скорость дрейфа аэрозольных частиц радиуса  $r$ ;  $K$  – кратность воздухообмена;  $g_0$  – дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации (здесь  $g_0(r)$  – плотность вероятности того, что в процессе нуклеации молекула интересующего нас вещества попадет в состав аэрозольной частицы радиуса  $r$ );  $b_1, \dots, b_N$  – постоянные, описывающие процесс нуклеации;  $F'(r, \vec{x}, t)$  – удельная (по радиусам аэрозольных частиц) плотность мощности внешних источников молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса  $r$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t$ .

Обозначим:

$$n(r, \vec{x}, t) = \int_0^r d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, \vec{x}, t), \quad n_\infty(\vec{x}, t) = \int_0^{+\infty} d\tilde{r} \cdot n'(\tilde{r}, \vec{x}, t),$$

где  $n(r, \vec{x}, t)$  – концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиусов не больше  $r$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t$ ,  $n_\infty(\vec{x}, t)$  – концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц всех радиусов в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t$ .

Для однозначного определения удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей заданы следующие дополнительные условия:

$$n'(r, \vec{x}, t_0) = n'_0(r, \vec{x}), \quad \vec{x} \in Q;$$

$$\alpha(r, \vec{x}, t) \left( \frac{\partial}{\partial n} \right)_{\vec{x}} n'(r, \vec{x}, t) + \beta(r, \vec{x}, t) n'(r, \vec{x}, t) = R(r, \vec{x}, t), \quad \vec{x} \in \partial Q, t \in (t_0, +\infty),$$

где  $n'_0(r, \vec{x})$  – удельная (по радиусам аэрозольных частиц) концентрация молекул интересующего нас вещества в составе аэрозольных частиц радиуса  $r$  в точке  $\vec{x}$  в момент времени  $t_0$ ;  $\alpha, \beta, R$  – коэффициенты, смысл которых аналогичен смыслу коэффициентов  $\alpha_k, \beta_k, R_k$ . Если область  $Q$  не является ограниченной, то в список до-

полнительных условий нужно включить условие регулярности решения на бесконечности.

Разумеется, невозможно найти аналитическое выражение для решения основной начально-краевой задачи в наиболее общей постановке. Однако основную начально-краевую задачу можно подвергнуть различным упрощениям. Например, будем считать, что частицы дрейфуют вертикально и будем рассматривать функции  $n_1, \dots, n_N, n'$  вдали от боковых стенок рабочего помещения. В этом случае можно пренебречь влиянием боковых стенок и считать, что область  $Q$  есть слой между двумя плоскостями:  $z = z_*$ ,  $z = z_* + h$  (где  $h$  – высота рабочего помещения). Если при этом «входные данные» не зависят от  $x, y$ , то решение тоже не зависит от этих переменных, что позволяет сделать уравнения пространственно одномерными. Можно рассматривать стационарное решение. Можно пренебречь диффузией аэрозолей (или газов и аэрозолей). Наконец, в грубом приближении можно считать, что гидролиз и нуклеация протекают бесконечно быстро и пренебречь наличием газов, содержащих токсичные вещества.

Рассмотрим следующую ситуацию: оседание частиц происходит в плоском слое; ГФУ попал в воздух за счёт разового выброса; есть нуклеация газов, есть диффузия газов, нет макроскопического движения газов. В этих предположениях получено аналитическое выражение для следующей величины:  $j(t)$  – плотность потока числа атомов токсичного вещества в составе газов на поверхности кожи в момент времени  $t$ . Теперь рассмотрим следующую ситуацию: оседание частиц происходит в плоском слое; ГФУ попал в воздух за счёт разового выброса; есть нуклеация газов, нет диффузии газов, нет макроскопического движения газов; нет диффузии аэрозолей, есть макроскопическое движение аэрозолей. В этих предположениях получено аналитическое выражение для следующей величины:  $n(z, t)$  – концентрация атомов токсичного вещества в составе газов и аэрозолей на высоте  $z$  в момент времени  $t$ .

В уравнение для удельной (по радиусам аэрозольных частиц) концентрации молекул интересующего нас вещества в составе аэрозолей входит вспомогательная функция  $g_0$  – дифференциальная функция распределения радиусов аэрозольных частиц, образующихся в процессе нуклеации. Это распределение было найдено ранее [11] авторами настоящей статьи с использованием данных, полученных сотрудниками Института биофизики Министерства здравоохранения СССР (ИБФ МЗ СССР; г. Москва) и Электрохимического завода (ЭХЗ; г. Зеленогорск) в модельном эксперименте по выбросу гексафторида урана в рабочем помещении. Оказалось, что оно хорошо описывается логарифмически нормальным законом. Решение основной начально-краевой задачи позволяет построить вспомогательную функцию  $\{g_1(r, z, t)\}_r$  – дифференциальную функцию распределения радиусов аэрозольных частиц на высоте  $z$  в момент времени  $t$  ( $g_1(r, z, t) = \frac{n'(r, z, t)}{n_\infty(z, t)}$ ). Далее можно найти средний

коэффициент прохождения в организм человека атомов токсичного вещества при ингаляционном поступлении. В грубом приближении средний коэффициент прохождения можно найти, используя вместо функции  $\{g_1(r, z, t)\}_r$  функцию  $g_0$ , которая описывается логарифмически нормальным законом. При этом можно воспользоваться результатами, описанными в публикациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ, International Commission on Radiological Protection, ICRP) [12].



Таблица 1

## Масса атомов урана, находящихся в глубине кожи

$t_{\text{в}i_0}$	Газы, перкутанное поступление, интегральная модель; $m_{\text{p.s.}}$ (мг)		
	$10^{21}$ ( $\text{M}^{-3}$ )	$10^{23}$ ( $\text{M}^{-3}$ )	$3,2 \cdot 10^{24}$ ( $\text{M}^{-3}$ )
10 с	$8,067 \cdot 10^{-4}$	$8,067 \cdot 10^{-2}$	2,581
20 с	$2,283 \cdot 10^{-3}$	$2,283 \cdot 10^{-1}$	7,305
30 с	$4,178 \cdot 10^{-3}$	$4,178 \cdot 10^{-1}$	$1,337 \cdot 10^1$
1 мин	$1,153 \cdot 10^{-2}$	1,153	$3,689 \cdot 10^1$
5 мин	$9,481 \cdot 10^{-2}$	9,481	$3,034 \cdot 10^2$
10 мин	$2,048 \cdot 10^{-1}$	$2,048 \cdot 10^1$	$6,553 \cdot 10^2$
20 мин	$4,216 \cdot 10^{-1}$	$4,216 \cdot 10^1$	$1,349 \cdot 10^3$
30 мин	$6,341 \cdot 10^{-1}$	$6,341 \cdot 10^1$	$2,029 \cdot 10^3$

Вторая модель описывает перкутанное поступление урана и фтора в организм человека в составе продуктов гидролиза ГФУ, а также прохождение токсичных веществ через организм. Построены две конкретные модели прохождения урана и фтора через организм – интегральная [11, 13] и дифференциальная [13]. Интегральная модель описывает прохождение токсичного вещества через организм, не уточняя его локализации, а дифференциальная модель позволяет определить депонирование токсичного вещества в ряде отдельных органов. Для урана расчёты проведены как в рамках интегральной, так и в рамках дифференциальной модели. Сравнение результатов показало, что при отсутствии подробной информации о метаболических параметрах токсичного вещества можно пользоваться интегральной моделью. Для фтора расчёты проведены только в рамках интегральной модели как раз ввиду отсутствия подробной информации о его метаболических параметрах.

Для урана в рамках интегральной модели получены аналитические выражения для следующих величин:  $N_1(t)$  – число атомов урана, осевших на кожу на временном промежутке  $[0, t]$ ;  $N_2(t)$  – число атомов урана, находящихся на поверхности кожи в момент времени  $t$ ;  $N_3(t)$  – число атомов урана, прошедших в глубину кожи на временном промежутке  $[0, t]$ ;  $N_4(t)$  – число атомов урана, находящихся в глубине кожи в момент времени  $t$ ;  $N_5(t)$  – число атомов урана, прошедших в кровотоки на временном промежутке  $[0, t]$ ;  $N_6(t)$  – число атомов урана, находящихся в кровотоке в момент времени  $t$ ;  $N_7(t)$  – число атомов урана, вышедших из организма с мочой на временном промежутке  $[0, t]$ . При этом используется аналитическое выражение для величины  $j(t)$ .

Для фтора в рамках интегральной модели получены аналогичные результаты. При этом рассматриваются только те атомы фтора, которые в итоге окажутся в составе вещества HF. Эти атомы мы называем «активными». Мы предполагаем, что атомы фтора, проникающие в глубину кожи, не задерживаясь, поступают в кровотоки. Соответственно, при изучении фтора, не имеет смысла вводить величины  $N_3(t)$ ,  $N_4(t)$ .

Дифференциальная модель основана на описанной в работе [15] камерной модели прохождения через различные органы токсичного вещества, введённого в организм путём внутривенной инъекции. В рамках дифференциальной модели проводится численный расчёт числа атомов урана в конкретном органе в конкретный момент времени (решается система ОДУ, описывающая переход урана из одной «камеры» в другую). При этом используется ана-

литическое выражение для скорости поступления урана в кровотоки (т. е. аналитическое выражение для величины  $\frac{d}{dt} N_5(t)$ ). Получена оценка точки глобального максимума функции, которая каждому моменту времени ставит в соответствие число атомов урана в конкретном органе. Соотношение между массами атомов урана, депонированных в различных органах, со временем меняется. В первые часы (до 3 ч) больше всего урана остаётся в плазме крови. Далее в течение суток (до 16 ч) по содержанию урана лидируют мягкие ткани. Затем в течение десяти дней лидируют почки. На единицу массы органа больше всего урана приходится на поверхность кортикальной кости, поверхность трабекулярной кости и почки. После тридцати дней больше всего урана остаётся в объёме трабекулярной кости.

Третья модель [11] описывает ингаляционное поступление урана и фтора в организм человека в составе продуктов гидролиза ГФУ, а также прохождение токсичных веществ через организм. Как и в случае перкутанного поступления, построены две конкретные модели прохождения урана и фтора через организм – интегральная и дифференциальная. Для урана расчёты проведены как в рамках интегральной, так и в рамках дифференциальной модели. Для фтора расчёты проведены только в рамках интегральной модели.

В рамках интегральной модели получены аналитические выражения для следующих величин:  $N_1(t)$  – число атомов токсичного вещества, вобранного внутрь организма при вдохе, на временном промежутке  $[0, t]$ ;  $N_2(t)$  – число атомов токсичного вещества, прошедших в кровотоки на временном промежутке  $[0, t]$ ;  $N_3(t)$  – число атомов токсичного вещества, находящихся в кровотоке в момент времени  $t$ ;  $N_4(t)$  – число атомов токсичного вещества, вышедших из организма с мочой на временном промежутке  $[0, t]$ . При этом используется аналитическое выражение для величины  $n(z_0, t)$  (здесь  $z_0$  – высота, на которой находится нос человека) а также средний коэффициент прохождения в организм человека атомов токсичного вещества при ингаляционном поступлении.

В рамках дифференциальной модели проводится численный расчёт числа атомов урана в конкретном органе в конкретный момент времени. При этом используется аналитическое выражение для скорости поступления урана в кровотоки (т. е. аналитическое выражение для величины  $\frac{d}{dt} N_2(t)$ ).

## Результаты

В табл. 1 для различных моментов времени ( $t$ ) и для различных значений начальной концентрации молекул ГФУ ( $n_0$ ) приведены значения массы атомов урана, находящихся в глубине кожи ( $m_{\text{p.s.}}$ ). Рассматривается перкутанное поступление токсичного вещества в составе газов. Результаты получены в рамках интегральной модели. Мы предполагаем, что в составе аэрозолей токсичные вещества перкутанно в организм человека не поступают [11, 13]. Следует заметить, что, ввиду линейности использованных уравнений, величина  $m_{\text{p.s.}}$  пропорциональна величине  $n_0$ .

В табл. 2 для различных моментов времени ( $t$ ) и для различных значений начальной концентрации молекул ГФУ ( $n_0$ ) приведены значения массы атомов урана, находящихся в кровотоке ( $m_{\text{p.b.}}$ ,  $m_{\text{i.b.}}$ ). Рассматриваются следующие условия: перкутанное поступление в составе газов; ингаляционное поступление в составе газов и аэро-

золей; средний коэффициент прохождения в организм человека атомов урана в составе аэрозольных частиц  $\xi_a = 0,34$ . Результаты получены в рамках интегральной модели. В табл. 3 приведены результаты по фтору, аналогичные результатам по урану, приведенным в табл. 2.

Во всех таблицах данные приведены для начальной концентрации молекул гексафторида урана в диапазоне от  $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$  до  $n_0 = 3,2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . Второе значение приблизительно соответствует концентрации молекул насыщенного пара ГФУ при температуре  $23^\circ\text{C}$ . Обратим внимание на то, что если время пребывания человека в аварийной ситуации  $t_0 = 10$  мин (наиболее реальное значение) и может реализоваться любое из указанных значений начальной концентрации молекул ГФУ, то масса атомов токсичного вещества в организме человека может принимать следующие значения: масса атомов урана в глубине кожи (перкутанное поступление с газами):  $m_U = 2,048 \cdot 10^{-1} \div 6,553 \cdot 10^2 \text{ мг}$ ; масса атомов урана в кровотоке (перкутанное поступление с газами):  $m_U = 2,107 \cdot 10^{-3} \div 6,744 \text{ мг}$ ; масса атомов урана в кровотоке (ингаляционное поступление с газами и аэрозолями):  $m_U = 3,120 \cdot 10^1 \div 9,985 \cdot 10^4 \text{ мг}$ ; масса «активных» атомов фтора в кровотоке (перкутанное поступление с газами):  $m_F = 9,845 \cdot 10^{-1} \div 3,150 \cdot 10^3 \text{ мг}$ ; масса «активных» атомов фтора в кровотоке (ингаляционное поступление с газами и аэрозолями):  $m_F = 1,282 \cdot 10^1 \div 4,104 \cdot 10^4 \text{ мг}$ .

В табл. 4 приведены результаты, полученные в рамках дифференциальной модели для перкутанного поступления урана в составе газов и для ингаляционного поступления урана в составе газов и аэрозолей. Данные приведены только для таких жизненно важных органов, как плазма крови и почки, так как в эти органы уран поступает быстрее, чем в другие рассмотренные в этой статье органы и ткани, и в большем количестве (за исключением поступления урана в поверхности различных костей). Замечание «max» при некоторых результатах означает, что это глобальный максимум функции, которая каждому моменту времени ставит в соответствие массу атомов урана в конкретном органе.

В первые моменты времени после выброса ГФУ масса атомов урана, находящихся в конкретном органе, растёт. Затем она достигает максимума и начинает убывать. Характер временной зависимости массы атомов урана одинаков для всех органов. От органа к органу меняется только максимальное значение упомянутой массы, и момент времени, в который оно достигается. Из данных в табл. 4 видно, что ингаляционное поступление менее инерционное, чем перкутанное и на несколько порядков больше по величине. Так как накопленная масса атомов урана пропорциональна начальной концентрации молекул ГФУ, то масса атомов этого токсичного вещества в организме человека может принимать следующие значения: масса атомов урана в плазме крови (перкутанное поступление с газами):  $m_{\text{max,U}} = 8,194 \cdot 10^{-3} \div 2,622 \cdot 10^1 \text{ мг}$ ; масса атомов урана в почках (перкутанное поступление с газами):  $m_{\text{max,U}} = 1,2698 \cdot 10^{-2} \div 4,0634 \cdot 10^1 \text{ мг}$ ; масса атомов урана в плазме крови (ингаляционное поступление с газами и аэрозолями):  $m_{\text{max,U}} = 3,110 \cdot 10^1 \div 9,952 \cdot 10^4 \text{ мг}$ ; масса атомов

Масса атомов урана, находящихся в кровотоке

$t/n_0$	Газы, перкутанное поступление, интегральная модель; $m_{\text{p.b.}}$ (мг)			Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление, $\xi_a = 0,34$ , интегральная модель; $m_{\text{p.b.}}$ (мг)		
	$10^{21} (\text{м}^{-3})$	$10^{23} (\text{м}^{-3})$	$3,2 \cdot 10^{24} (\text{м}^{-3})$	$10^{21} (\text{м}^{-3})$	$10^{23} (\text{м}^{-3})$	$3,2 \cdot 10^{24} (\text{м}^{-3})$
10 с	$8,312 \cdot 10^{-6}$	$8,312 \cdot 10^{-4}$	$2,660 \cdot 10^{-2}$	1,554	$1,554 \cdot 10^2$	$4,973 \cdot 10^3$
20 с	$2,352 \cdot 10^{-5}$	$2,352 \cdot 10^{-3}$	$7,527 \cdot 10^{-2}$	3,077	$3,077 \cdot 10^2$	$9,847 \cdot 10^3$
30 с	$4,305 \cdot 10^{-5}$	$4,305 \cdot 10^{-3}$	$1,378 \cdot 10^{-1}$	4,544	$4,544 \cdot 10^2$	$1,454 \cdot 10^4$
1 мин	$1,188 \cdot 10^{-4}$	$1,188 \cdot 10^{-2}$	$3,801 \cdot 10^{-1}$	8,486	$8,486 \cdot 10^2$	$2,716 \cdot 10^4$
5 мин	$9,763 \cdot 10^{-4}$	$9,763 \cdot 10^{-2}$	3,124	$2,364 \cdot 10^1$	$2,364 \cdot 10^3$	$7,565 \cdot 10^4$
10 мин	$2,107 \cdot 10^{-3}$	$2,107 \cdot 10^{-1}$	6,744	$3,120 \cdot 10^1$	$3,120 \cdot 10^3$	$9,985 \cdot 10^4$
20 мин	$4,333 \cdot 10^{-3}$	$4,333 \cdot 10^{-1}$	$1,387 \cdot 10^1$	$3,863 \cdot 10^1$	$3,863 \cdot 10^3$	$1,236 \cdot 10^5$
30 мин	$6,508 \cdot 10^{-3}$	$6,508 \cdot 10^{-1}$	$2,083 \cdot 10^1$	$4,187 \cdot 10^1$	$4,187 \cdot 10^3$	$1,340 \cdot 10^5$

Таблица 3

Масса «активных» атомов фтора, находящихся в кровотоке

$t/n_0$	Газы, перкутанное поступление, интегральная модель; $m_{\text{p.b.}}$ (мг)			Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление, $\xi_a = 0,34$ , интегральная модель; $m_{\text{p.b.}}$ (мг)		
	$10^{21} (\text{м}^{-3})$	$10^{23} (\text{м}^{-3})$	$3,2 \cdot 10^{24} (\text{м}^{-3})$	$10^{21} (\text{м}^{-3})$	$10^{23} (\text{м}^{-3})$	$3,2 \cdot 10^{24} (\text{м}^{-3})$
10 с	$3,382 \cdot 10^{-3}$	$3,382 \cdot 10^{-1}$	$1,082 \cdot 10^1$	$4,907 \cdot 10^{-1}$	$4,907 \cdot 10^1$	$1,570 \cdot 10^3$
20 с	$1,030 \cdot 10^{-2}$	1,030	$3,297 \cdot 10^1$	$9,580 \cdot 10^{-1}$	$9,580 \cdot 10^1$	$3,066 \cdot 10^3$
30 с	$1,953 \cdot 10^{-2}$	1,953	$6,250 \cdot 10^1$	1,399	$1,399 \cdot 10^2$	$4,475 \cdot 10^3$
1 мин	$5,640 \cdot 10^{-2}$	5,640	$1,805 \cdot 10^2$	2,564	$2,564 \cdot 10^2$	$8,206 \cdot 10^3$
5 мин	$4,737 \cdot 10^{-1}$	$4,737 \cdot 10^1$	$1,516 \cdot 10^3$	7,923	$7,923 \cdot 10^2$	$2,535 \cdot 10^4$
10 мин	$9,845 \cdot 10^{-1}$	$9,845 \cdot 10^1$	$3,150 \cdot 10^3$	$1,282 \cdot 10^1$	$1,282 \cdot 10^3$	$4,104 \cdot 10^4$
20 мин	1,861	$1,861 \cdot 10^2$	$5,956 \cdot 10^3$	$2,182 \cdot 10^1$	$2,182 \cdot 10^3$	$6,981 \cdot 10^4$
30 мин	2,573	$2,573 \cdot 10^2$	$8,234 \cdot 10^3$	$2,995 \cdot 10^1$	$2,995 \cdot 10^3$	$9,585 \cdot 10^4$

Таблица 4

Масса атомов урана, находящихся в плазме крови и почках

$t$	$n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , $\xi_a = 0,34$ , дифференциальная модель; $m$ (мг)			
	Газы, перкутанное поступление		Газы + аэрозоли, ингаляционное поступление	
	Плазма крови	Почки	Плазма крови	Почки
20 мин	$3,474 \cdot 10^{-3}$	$7,450 \cdot 10^{-5}$	$3,108 \cdot 10^1$	1,029
21 мин	$3,611 \cdot 10^{-3}$	$8,176 \cdot 10^{-5}$	$3,110 \cdot 10^1$ (max)	1,093
22 мин	$3,744 \cdot 10^{-3}$	$8,929 \cdot 10^{-5}$	$3,109 \cdot 10^1$	1,156
2 ч	$8,180 \cdot 10^{-3}$	$1,469 \cdot 10^{-3}$	$1,167 \cdot 10^1$	5,298
3 ч	$8,194 \cdot 10^{-3}$ (max)	$2,475 \cdot 10^{-3}$	7,025	6,385
4 ч	$7,872 \cdot 10^{-3}$	$3,454 \cdot 10^{-3}$	4,905	7,079
18 ч	$2,279 \cdot 10^{-3}$	$1,125 \cdot 10^{-2}$	$3,326 \cdot 10^{-1}$	9,223
19 ч	$2,053 \cdot 10^{-3}$	$1,148 \cdot 10^{-2}$	$2,879 \cdot 10^{-1}$	9,227 (max)
20 ч	$1,847 \cdot 10^{-3}$	$1,167 \cdot 10^{-2}$	$2,509 \cdot 10^{-1}$	9,226
1 сут 10 ч	$4,308 \cdot 10^{-4}$	$1,2695 \cdot 10^{-2}$	$7,848 \cdot 10^{-2}$	8,984
1 сут 11 ч	$3,910 \cdot 10^{-4}$	$1,2698 \cdot 10^{-2}$ (max)	$7,539 \cdot 10^{-2}$	8,960
1 сут 12 ч	$3,555 \cdot 10^{-4}$	$1,2697 \cdot 10^{-2}$	$7,268 \cdot 10^{-2}$	8,936

## Масса «активных» атомов фтора, прошедших в кровоток

<i>t</i>	Аэрозоли, ингаляционное поступление, $n_0 = 10^{21} \text{ м}^{-3}$ ; $m$ (мг)				
	Задняя часть носового хода, рот, глотка, гортань, $\xi_a = 0,230$	Трахео- бронхиальный отдел, $\xi_a = 0,019$	Бронхиолы, $\xi_a = 0,011$	Альвеолы, $\xi_a = 0,080$	Все отделы, $\xi_a = 0,340$
10 с	$2,434 \cdot 10^{-3}$	$2,011 \cdot 10^{-4}$	$1,164 \cdot 10^{-4}$	$8,467 \cdot 10^{-4}$	$3,598 \cdot 10^{-3}$
20 с	$1,302 \cdot 10^{-2}$	$1,075 \cdot 10^{-3}$	$6,226 \cdot 10^{-4}$	$4,528 \cdot 10^{-3}$	$1,924 \cdot 10^{-2}$
30 с	$3,289 \cdot 10^{-2}$	$2,717 \cdot 10^{-3}$	$1,573 \cdot 10^{-3}$	$1,144 \cdot 10^{-2}$	$4,863 \cdot 10^{-2}$
1 мин	$1,468 \cdot 10^{-1}$	$1,213 \cdot 10^{-2}$	$7,021 \cdot 10^{-3}$	$5,106 \cdot 10^{-2}$	$2,170 \cdot 10^{-1}$
5 мин	2,409	$1,990 \cdot 10^{-1}$	$1,152 \cdot 10^{-1}$	$8,380 \cdot 10^{-1}$	3,562
10 мин	5,692	$4,702 \cdot 10^{-1}$	$2,722 \cdot 10^{-1}$	1,980	8,415
20 мин	$1,184 \cdot 10^1$	$9,781 \cdot 10^{-1}$	$5,663 \cdot 10^{-1}$	4,118	$1,750 \cdot 10^1$
30 мин	$1,744 \cdot 10^1$	1,441	$8,341 \cdot 10^{-1}$	6,066	$2,578 \cdot 10^1$

урана в почках (ингаляционное поступление с газами и аэрозолями):  $m_{\text{max,U}} = 9,227 \div 2,953 \cdot 10^4$  мг.

В табл. 5 для ингаляционного поступления в составе аэрозолей приведены значения массы «активных» атомов фтора, прошедших в кровоток через конкретный отдел дыхательной системы.

## Обсуждение

Чтобы оценить воздействие на человека рассчитанных масс урана и фтора, нужно сравнить их с теми количествами токсичных веществ, которые вызывают у человека заболевания различной степени тяжести, вплоть до смертельного исхода. Эти критические количества урана и фтора определяют на основе клинической практики, а также по данным патологоанатомов, исследовавших трупы людей, которые погибли в аварийных ситуациях. Уран особенно токсичен для почек. Так, на сегодняшний день опасным считается содержание в организме урана массой 100 мг [16]; минимально действующая нагрузка урана на почки (отношение массы депонированного урана к массе органа) –  $q = 8 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$  [9]; минимально действующая нагрузка урана на лёгкие –  $q = 45 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$  [9]. Для фтора показатели таковы:  $m = 300$  мг при разовом поступлении в организм человека является смертельной дозой [8].

В работах [8, 17] приводятся сведения, полученные при изучении состояния здоровья людей, оказавшихся в условиях аварийного выброса гексафторида урана на обогатительных заводах. Эти сведения сводятся к следующему. При  $m < 5$  мг поступившего в организм фтора у некоторых людей, попавших в аварийную ситуацию, учащается пульс, приглушаются тоны сердца, возникают изменения в крови, появляется белок в моче (протеинурия). При  $m = 5 \div 9$  мг ко всем изменениям в состоянии здоровья добавляются изменения в ЭКГ. При  $m = 10 \div 19$  мг остаются те же изменения, что и при  $m = 5 \div 9$  мг, но все они становятся заметно более выраженными и охватывают большую часть людей, попавших в аварийную ситуацию. При  $m = 20 \div 65$  мг к состоянию здоровья людей добавляются кашель, стенокардия, цианоз (синюшная окраска кожи и слизистых оболочек), хрипы в лёгких, несколько сдвигаются изменения в крови, остальные изменения те же, что и при  $m = 10 \div 19$  мг. При  $m > 100$  мг перечисленные изменения наблюдаются не у отдельных лиц, а у всех пострадавших. Все сведения по массам фтора, поступающего в организм, получены по результатам анализов мочи и по данным, поступившим от патолого-

анатомов. Установлено, что выход фтора с мочой осуществляется в течение нескольких дней после поступления его в организм за время нахождения в аварийной ситуации. Значит, способ определения массы очень медленный.

Методы математического моделирования дают возможность быстрой ориентации персонала медицинской санитарной части предприятия в принятии решений при оказании помощи пострадавшим, если обеспечить:

– измерение концентрации молекул гексафторида урана в воздухе рабочего помещения в момент аварийного выброса;

– наличие в медсанчасти таблиц всех необходимых теоретических данных по поступлению урана и фтора в организм человека и в отдельные его органы;

– наличие в медсанчасти таблиц данных по состоянию потерпевших и по поступлению токсичных веществ в организмы потерпевших в предыдущих аварийных ситуациях.

## Заключение

Знание рассчитанных значений масс атомов токсичных веществ, поступивших в организм, значительно ускоряет и упрощает решение вопроса по отбору людей, нуждающихся в срочной госпитализации после аварии. Так как распределение токсичных веществ по отдельным органам осуществляется кровью, и в кровь эти вещества поступают быстрее всего, то, прежде всего, нужно принимать меры по выведению урана и фтора из сосудистого русла. Распределение урана по отдельным органам – процесс более инерционный, чем просто поступление этого токсичного вещества в организм. Это позволяет организовать быструю защиту тех органов, в которые наиболее быстро проникает уран. Так как перкутанное поступление фтора сравнимо по величине с ингаляционным, то, как и рекомендуют авторы статей, поднимающих эту тему [8], необходимо прежде всего обмыть кожу пострадавшего водой, чтобы по выходу из аварийного помещения прекратить поступление фтора с поверхности кожи в кровоток. Чтобы теоретические методы определения поступления урана и фтора в организм и в отдельные органы пострадавшего могли быть практически использованы, необходимо организовать во всех рабочих помещениях, в которых могут произойти аварийные выбросы гексафторида урана, измерение концентрации молекул этого газа в течение всего рабочего времени.

## Выводы

1. Методами математического моделирования определены: динамика урана в глубине кожи (перкутанное поступление); динамика урана и фтора в кровотоке (т. е. усредненная динамика урана и фтора в организме; перкутанное поступление, ингаляционное поступление); динамика урана в плазме крови и в почках (перкутанное поступление, ингаляционное поступление). Получена оценка точки глобального максимума функции, которая каждому моменту времени ставит в соответствие число атомов урана в конкретном органе. Кроме того, найдены. Поступление фтора в составе аэрозолей в кровоток через конкретные отделы дыхательной системы. Диапазон значений масс атомов урана, депонированных в глубине кожи за 10 мин (наиболее реальное значение времени пребывания человека в аварийной ситуации; перкутан-



ное поступление), соответствующий диапазону реальных значений начальной концентраций молекул гексафторида урана. Диапазон значений масс атомов урана и фтора, депонированных в кровотоке за 10 мин (перкутанное поступление, ингаляционное поступление), соответствующий диапазону реальных значений начальной концентраций молекул гексафторида урана. Диапазон значений масс атомов урана в плазме крови и в почках (перкутанное поступление, ингаляционное поступление), соответствующий диапазону реальных значений начальной концентрации молекул гексафторида урана.

2. Проведено сравнение теоретических данных по массе урана и фтора, депонированных в кровотоке за 10 мин (перкутанное поступление, ингаляционное поступление), с экспериментальными данными по массам, поступление которых сопровождается различными функциональными нарушениями здоровья, острыми интоксикациями средней степени тяжести в течение часа с момента поступления  $UF_6$  и изменением состояния отдельных органов и тканей на длительный (порядка года) срок.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.  
**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Апсэ В.А., Шмелев А.Н. *Ядерные технологии: учебное пособие*. М.: МИФИ; 2008.
2. Надеждинский А.И., Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю., Вязов И.Е., Малогин С.Л., Пономарев Ю.Н., Понуровский Я.Я., Ставрова Д.Б., Болясов Д.А. Экспресс-методы измерения степени обогащения гексафторида урана и следовых количеств и HF в атмосфере на основе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазона. *Оптика атмосферы и океана*. 2005; 18(9): 785-94.
3. Рукавишников В.С., Дьякович М.П., Гуськова Т.М., Шахметов С.Ф. Человеческий фактор в контексте безопасности. *Медицина труда и промышленная экология*. 2010; 1: 15-8.
4. Калистратова В.С., Беляев И.К., Жорова Е.С., Нисимов П.Г., Парфенова И.М., Тищенко Г.С., Цапков М.М. *Радиобиология инкорпорированных радионуклидов*. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России; 2012.
5. Гребенюк А.Н., Сидоров Д.А., Башарин В.А. Безопасность жизнедеятельности. ч.1. В кн.: *Безопасность жизнедеятельности. Медицина катастроф: учебник для курсантов и студентов медицинских и фармацевтических вузов (факультетов)*. СПб.: ВМедА; 2014.
6. Гребенюк А.Н., Сидоров Д.А., Башарин В.А. Медицина катастроф. ч.2. В кн.: *Безопасность жизнедеятельности. Медицина катастроф: учебник для курсантов и студентов медицинских и фармацевтических вузов (факультетов)*. СПб.: ВМедА; 2015.
7. Howland J.W. Pharmacology and toxicology of uranium compounds. In: Voegtlin C., Hodge H.C., eds. *Studies on human exposures to uranium compounds*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1949: 993-1017.
8. Гастева Г.Н., Бад'ин В.И., Молоканов А.А., Мордашева В.В. Клиническая токсикология химических соединений урана при хронической экспозиции. В кн.: Ильин Л.А., ред. *Радиационная медицина. Радиационные поражения человека. т. 2*. М.: ИздАТ; 2001: 369-88.
9. Галибин Г.П., Новиков Ю.В. *Токсикология промышленных соединений урана*. М.: Атомиздат; 1976.
10. Шандала Н.К., Иванов Е.А., Романов В.В. Методология и результаты проведения исследовательского социально-гигиенического мониторинга в районах АЭС. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2007; 2: 21-34.
11. Бабенко С.П., Бад'ин А.В. Верификация математической модели, описывающей воздействие на организм человека гексафторида урана на предприятии атомной промышленности. *Вестник Московского университета. Серия: Физика. Астрономия*. 2014; 2: 22-30.
12. *Труды МКРЗ. Рекомендации Международной комиссии по радиационной защите от 2007 года. Публикация 103 МКРЗ*. Пер. с англ. Киселев Ф.М., Шандала Н.К., ред. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана»; 2009.
13. Бабенко С.П., Бад'ин А.В. О перкутанном поступлении токсичных веществ в организм человека из атмосферы производственного помещения. *Наука и образование (электронный журнал) МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014; 01. doi: 10.7463/0114.0671133.
14. Осанов Д.П. *Дозиметрия и радиационная биофизика кожи*. М.: Энергоатомиздат; 1983.
15. Leggett R.W., Pellmar T.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments. *J. Environ. Radioact.* 2003; 64(2-3): 205-25.
16. Гастева Г.Н., Мордашева В.В., Гуськова А.К. Работа с соединениями урана. В кн.: Ильин Л.А., ред. *Руководство по организации медицинского обслуживания лиц, подвергшихся действию ионизирующего излучения*. М.: Энергоатомиздат; 1986: 90-107.
17. Маснавиева Л.Б., Кудаева И.В., Ефимова Н.В. Уровни специфических аутоантител и риски формирования патологических процессов в условиях ингаляционного воздействия химических веществ. *Гигиена и санитария*. 2015; 7: 106-10.

## References

1. Apse V.A., Shmelev A.N. *Nuclear technology: a training manual [Yadernye tekhnologii: uchebnoe posobie]*. Moscow: MIFI; 2008. (in Russian)
2. Nadezhdinskiy A.I., Nabiev Sh.Sh., Grigor'ev G.Yu., Vyazov I.E., Malugin S.L., Ponomarev Yu.N., Ponurovskiy Ya.Ya., Stavrovskiy D.B., Bolyasov D.A. Rapid methods for measuring the degree of enrichment of uranium hexafluoride and trace amounts of and HF in the atmosphere based on diode lasers near and mid-infrared. *Optika atmosfery i okeana*. 2005; 18(9): 785-94. (in Russian)
3. Rukavishnikov V.S., D'yakovich M.P., Gus'kova T.M., Shayakhmetov S.F. The human factor in the security context. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2010; (1): 15-8. (in Russian)
4. Kalistratova V.S., Belyaev I.K., Zhorova E.S., Nisimov P.G., Parfenova I.M., Tishchenko G.S., Tsapkov M.M. *Radio incorporated radionuclides [Radiobiologiya inkorporirovannykh radionuklidov]*. Moscow: FGBU GNTs FMBTs im. A.I. Burnazyana FMBA Rossii; 2012. (in Russian)
5. Grebenyuk A.N., Sidorov D.A., Basharin V.A. Health and safety. vol. 1. In: *Health and safety. Emergency medicine: a textbook for students and students of medical and pharmaceutical universities (faculties) [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Meditsina katastrof: uchebnik dlya kursantov i studentov meditsinskikh i farmatsevticheskikh vuzov (fakul'tetov)]*. St. Petersburg: VMedA; 2014. (in Russian)
6. Grebenyuk A.N., Sidorov D.A., Basharin V.A. Emergency Medicine. vol. 2. In: *Health and safety. Emergency medicine: a textbook for students and students of medical and pharmaceutical universities (faculties) [Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Meditsina katastrof: uchebnik dlya kursantov i studentov meditsinskikh i farmatsevticheskikh vuzov (fakul'tetov)]*. St. Petersburg: VMedA; 2015. (in Russian)
7. Howland J.W. Pharmacology and toxicology of uranium compounds. In: Voegtlin C., Hodge H.C., eds. *Studies on human exposures to uranium compounds*. New York, Toronto, London: McGraw-Hill Book Company, Inc.; 1949: 993-1017.
8. Gasteva G.N., Bad'in V.I., Molokanov A.A., Mordasheva V.V. Clinical toxicology of chemical compounds of uranium at chronic exposure. In: Il'in L.A., ed. *Nuclear medicine. Radiation injury man. vol. 2. [Radiatsionnaya meditsina. Radiatsionnye porazheniya cheloveka. vol. 2]*. Moscow: IzdAT; 2001: 369-88. (in Russian)
9. Galibin G.P., Novikov Yu.V. *Toxicology of industrial uranium compounds [Toksikologiya promyshlennykh soedineniy urana]*. Moscow: Atomizdat; 1976. (in Russian)
10. Shandala N.K., Ivanov E.A., Romanov V.V. The methodology and the results of the research of social and hygienic monitoring in the areas of nuclear power plants. *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy*. 2007; (2): 21-34. (in Russian)
11. Babenko S.P., Bad'in A.V. Verification of a mathematical model that describes the action of uranium hexafluoride on the human body in facilities of the atomic industry. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya: Fizika. Astronomiya*. 2014; (2): 22-30. (in Russian)
12. ICRP, 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103*. Elsevier Ltd.; 2007: Ann. ICRP 37(2-4).
13. Babenko S.P., Bad'in A.V. On percutaneous injection of toxic substances into the human organism from the workplace atmosphere. *Nauka i obrazovanie (elektronnyy zhurnal) MG TU im. N.E. Bauman*. 2014; (01). doi: 10.7463/0114.0671133. (in Russian)
14. Osanov D.P. *Dosimetry and radiation biophysics of the skin [Dozimetriya i radiatsionnaya biofizika kozhi]*. Moscow: Energoatomizdat; 1983. (in Russian)
15. Leggett R.W., Pellmar T.C. The biokinetics of uranium migrating from embedded DU fragments. *J. Environ. Radioact.* 2003; 64(2-3): 205-25.
16. Gasteva G.N., Mordasheva V.V., Gus'kova A.K. Working with uranium compounds. In: Il'in L.A., ed. *Guidelines on the organization of medical care of persons exposed to ionizing radiation [Rukovodstvo po organizatsii meditsinskogo obsluzhivaniya lits, podvergnivshisya deystviyu ioniziruyushchego izlucheniya]*. Moscow: Energoatomizdat; 1986: 90-107. (in Russian)
17. Masnavieva L.B., Kudaeva I.V., Efimova N.V. The levels of specific autoantibodies and the risks of formation of pathological processes in terms of inhalation exposure to chemicals. *Gigiena i sanitariya*. 2015; (7): 106-10. (in Russian)

Поступила 15.01.17

Принята к печати 18.10.17