

Е.Е. Аладова, **Е.К. Василенко**, А.В. Ефимов, В.В. Востротин, М.Э. Сокольников, С.А. Романов

МЕТОДОЛОГИЯ НОРМИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ПЛУТОНИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Южно-Уральский институт биофизики, Озёрск

Контактное лицо: Елена Евгеньевна Аладова, e-mail: aladova@subi.su

Посвящается памяти Е.К. Василенко

От авторов

В последние годы жизни Евгений Константинович Василенко работал над важнейшими нормативно-методическими документами по организации и проведению дозиметрического контроля внутреннего облучения профессиональных работников при поступлении в организм плутония. Особую роль он уделял разработке подхода к нормированию воздействия соединений плутония на основании оценок пожизненного избыточного риска. Под его руководством вышло несколько публикаций, посвященных проблеме ограничения профессионального облучения от долгоживущих радионуклидов. Представленная статья была подготовлена при непосредственном участии Евгения Константиновича, и она продолжает начатую им серию публикаций по данной проблеме. Мы с благодарностью вспоминаем Евгения Константиновича Василенко, как замечательного ученого, творческого профессионала и многосторонне одаренного человека.

РЕФЕРАТ

Обоснование: Представленные материалы посвящены разработке методологии нормирования воздействия от плутония по величине годового избыточного риска, который не должен превышать 1×10^{-3} . Показано, что существующий подход к нормированию плутония по ожидаемой эффективной дозе не отражает реальных уровней облучения персонала и, следовательно, не обеспечивает необходимый уровень радиационной безопасности на производствах по переработке плутония.

Результаты: С использованием данных эпидемиологического наблюдения за когортой работников ПО «Маяк» была выполнена оценка избыточного относительного риска на единицу дозы радиационного воздействия для каждого из органов депонирования плутония-239 с целью описания зависимости смертности от рака легких, печени и скелета от дозы альфа-излучения плутония-239. Эквивалентные дозы на органы депонирования плутония и годовой избыточный риск, сформированный этими дозами, для различных сценариев поступления плутония рассчитываются по результатам контроля активности плутония в моче. При расчете годовой эффективной дозы по результатам контроля годовой эквивалентной дозы необходимо учитывать зависимость взвешивающих коэффициентов для органов депонирования плутония от возраста работника, в котором произошло облучение, а при оценке величины радиационного риска – зависимость коэффициента риска от возраста.

Заключение: Применение величины годового избыточного риска в качестве контролируемого и нормируемого показателя при индивидуальном дозиметрическом контроле внутреннего облучения от поступления плутония является наиболее корректным. Предлагаемый подход к нормированию может быть использован при остром и хроническом ингаляционном поступлении плутония, а также при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы.

Ключевые слова: внутреннее облучение, плутоний, пожизненный риск, предел дозы, органы депонирования, радиационный контроль, ожидаемая эффективная доза

Для цитирования: Аладова Е.Е., Василенко Е.К., Ефимов А.В., Востротин В.В., Сокольников М.Э., Романов С.А. Методология нормирования внутреннего облучения от плутония: проблемы и пути решения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 6. С. 36–43. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-36-43

Е.Е. Aladova, **E.K. Vasilenko**, A.V. Efimov, V.V. Vostrotin, M.E. Sokolnikov, S.A. Romanov

Methodology for Rationing Internal Exposure from Plutonium: Problems and Solutions

Southern Urals Biophysics Institute, Ozersk, Russia

Contact person: E.E. Aladova, e-mail: aladova@subi.su

Dedicated to E.K. Vasilenko memory

From the authors

During the last years of his life, Evgeny Konstantinovich Vasilenko worked on the most important regulatory and methodological documents on the organization and conduct of dosimetric control of internal exposure due to plutonium intake for the professional workers. He paid a special role to developing an approach to rationing the effects of plutonium compounds based on lifetime excess risk assessments. Under his leadership, several publications were published on the problem of limiting occupational exposure from the long-lived radionuclides. The presented article was prepared with the direct participation of Evgeny Konstantinovich, and it continues the series of publications he started on this problem.

We remember with gratitude Evgeny Konstantinovich Vasilenko as a wonderful scientist, creative professional and multi-talented person.

ABSTRACT

Purpose: The presented materials are devoted to the development of a methodology for rationing the impact of plutonium intake by the amount of annual excess risk, which should not exceed 1×10^{-3} . It is shown that the existing approach to the rationing of plutonium by the expected effective dose does not reflect the actual levels of personnel exposure and, therefore, does not provide the necessary level of radiation safety at plutonium processing plants.

Results: Using data from epidemiological surveillance of a cohort of employees of the Mayak software, an assessment of the excessive relative risk per unit dose of radiation exposure for each of the plutonium-239 deposition organs was performed in order to describe the dependence of mortality from lung, liver and skeletal cancer on the dose of alpha radiation of plutonium-239. Equivalent doses to plutonium deposit organs and the annual excess risk generated by these doses for various plutonium intake scenarios are calculated based on the results of monitoring the activity of plutonium in urine. When calculating the annual effective dose based on the results of monitoring the annual equivalent dose, it is necessary to take into account the dependence of the weighing coefficients for the plutonium deposit bodies on the age of the employee at which the exposure occurred, and when assessing the magnitude of the radiation risk, the dependence of the risk coefficient on age.

Conclusion: The use of the annual excess risk value as a controlled and normalized indicator for the individual dosimetry control of internal radiation from the plutonium intake is the most correct. The proposed approach to rationing can be used for acute and chronic inhalation intake of plutonium, as well as for the intake of plutonium through damaged skin.

Keywords: internal exposure, plutonium, lifetime risk, dose limit, deposit organs, radiation monitoring, expected effective dose

For citation: Aladova EE, Vasilenko EK, Efimov AV, Vostrotnin VV, Sokolnikov ME, Romanov SA. Methodology for Rationing Internal Exposure from Plutonium: Problems and Solutions. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(6):36–43. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-36-43

Введение

В действующих в России Нормах радиационной безопасности НРБ-99/2009 [1], так же, как в рекомендациях МАГАТЭ [2] и в рекомендациях МКРЗ №103 [3], допустимые дозовые пределы установлены исходя из принципа непревышения контрольного уровня минимально значимого радиационного риска. В настоящее время величина социально-приемлемого годового избыточного риска для персонала радиационно-опасных производств составляет 1×10^{-3} , при этом допустимые уровни радиационного воздействия являются производными от данного значения риска [1].

Согласно общепринятой в мире линейной беспороговой концепции зависимости риска стохастических эффектов от дозы, величина риска пропорциональна полученной дозе и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска (r_E).

Усредненная величина коэффициента риска при установлении предела годовой эффективной дозы персонала для условий равномерного облучения всех органов и тканей принята равной $r_E = 5 \times 10^{-3} \text{ Зв}^{-1}$. При этом величина годового предела дозы $E_{\text{год}}$ составит 20 мЗв. Этот предел годовой эффективной дозы принят в нормах радиационной безопасности для нормирования доз внешнего облучения [1]. При внутреннем облучении за счет поступления радионуклидов в организм персонала, нормируется не годовая, а ожидаемая эффективная доза (ОЭД) E_{50} . При этом для радионуклидов с коротким периодом полувыведения из организма, когда доза облучения от поступления формируется в течение года, годовая эффективная доза совпадает с ОЭД, то есть $E_{\text{год}} = E_{50}$.

Изотопы плутония даже при разовом поступлении облучают органы депонирования в течение всей последующей жизни человека, однако суммарная за 50 лет доза приписывается одному году – году поступления плутония в организм. При хроническом поступлении плутоний накапливается в этих органах, увеличивая годовые дозы облучения.

При существующем подходе $E_{\text{год}} \gg E_{50}$, т.е. доза в год поступления увеличивается в несколько раз, а доза за последующие 49 лет жизни человека приравнивается к 0. Фактически пролонгированная за 50 лет доза облучения превращается в дозу острого облучения, которая огра-

ничивается тем же пределом дозы, что и годовая эффективная доза.

По сути, E_{50} характеризует величину пожизненного, а не годового избыточного риска, величина которого используется для нормирования. При этом величина ОЭД не отражает фактических уровней облучения работника и не должна быть использована для целей радиационного контроля. Все вышесказанное справедливо и для других длительно депонируемых радионуклидов.

При инкорпорации плутония облучение крайне неравномерно, так как облучаются прежде всего органы основного депонирования (легкие, печень, скелет). В связи с этим коэффициент радиогенного риска при облучении от инкорпорированного плутония будет отличаться от принятого в Нормах радиационной безопасности. Более того, коэффициент радиогенного риска зависит и от возраста, в котором эта доза была получена.

Использование постоянного тканевого множителя при оценке эффективной дозы приводит к значительным (в несколько раз) неопределенностям при оценке величины годового избыточного риска.

Приведенные факторы затрудняют проведение радиационного контроля персонала при работе с открытыми источниками плутония на предприятиях атомной отрасли.

Материал и методы

Для описания зависимости смертности от рака легких, печени и скелета от дозы альфа-излучения плутония-239, накопленного в этих органах, была проведена оценка избыточного относительного риска на единицу дозы радиационного воздействия для каждого из органов депонирования плутония-239. Для этого были использованы данные эпидемиологического наблюдения за когортой работников ПО «Маяк» [4, 5], включающие основные характеристики когорты и метода расчета радиационного риска. Для оценки канцерогенного риска использованы модели избыточного относительного риска, аналогичные использованным в работах [6–9]. Для каждого из полученных коэффициентов радиогенного риска были рассчитаны точечная оценка, а также верхняя граница 99 % доверительного интервала [10, 11]. Показатели пожизненного избыточного риска рассчитывались как показано в работе [11].

Дозы альфа-излучения плутония-239 для органов депонирования были оценены по дозиметрической модели «Дозы-2008» [12].

Величина ОЭД в соответствии с НРБ-99/2009 [1] определялась как:

$$E_{50} = \Pi \cdot \zeta_{\text{перс}}^{\text{возд}} \quad (1)$$

где E_{50} – ожидаемая эффективная доза, мЗв;

Π – величина годового поступления, Бк/год;

$\zeta_{\text{перс}}^{\text{возд}}$ – дозовый коэффициент, Зв/Бк.

Несколько слов следует сказать о контроле поступления плутония. На рис. 1 представлена схема выведения плутония из организма при хроническом и остром ингаляционном поступлении.

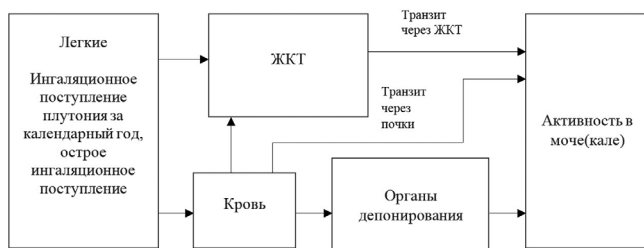


Рис. 1. Схема выведения плутония из организма при хроническом и остром ингаляционном поступлении

Fig. 1. Scheme of plutonium removal from the body during chronic and acute inhalation intake

При хроническом ингаляционном поступлении активность плутония в биосубстратах формируется за счет:

- выведения плутония, поступившего при ингаляции нуклида за календарный год;
 - выведения плутония, задержанного в органах основного депонирования с начала трудовой деятельности.
- Составляющая активности, обусловленная величиной транзита плутония через ЖКТ и почки, не приводит к облучению органов основного депонирования радионуклида, но вносит дополнительную неопределенность при расчетах доз внутреннего облучения.

Тем не менее, величина транзита плутония по методологии НРБ-99/2009 [1] используется для оценки величины его годового поступления и оценки (через дозовый коэффициент) величины ОЭД. Однако, на практике величину ингаляционного поступления, даже на уровне ПП_{перс}, за счет транзита плутония в течение года невозможно измерить в моче из-за недостаточной чувствительности существующих методов измерения и неопределенности момента поступления плутония.

В отличие от хронического, при остром поступлении, как правило, поступление однократно и значительно по активности, а время поступления известно. В этом случае по нескольким результатам измерений активности нуклида в образцах биосубстратов (моча, кал) в период транзита плутония и физико-химическим параметрам аэрозолей оценивается величина его поступления в организм и ОЭД.

Таким образом, измерить величину годового поступления плутония и оценить величину ОЭД биофизическим методом контроля можно только в случаях острого, как ингаляционного, так и раневого, поступления.

Оценка доз облучения при хроническом ингаляционном поступлении проводится по активности плутония, выводимого из органов депонирования. Для этого отбор проб мочи для биофизического обследования проводят после месячного и более отсутствия контакта работника

с плутонием (например, после отпуска). При этом количество выведенного из органов депонирования плутония за год измерить существующими методами невозможно. Однако, при накоплении плутония в органах депонирования в течение нескольких лет, величина выведенной активности может превысить предел обнаружения используемого метода контроля. Измеренная активность и время контакта работника с плутонием позволяют рассчитать усредненную величину его поступления в организм, содержание и дозы облучения органов депонирования плутония.

При поступлении плутония-239 через поврежденные кожные покровы модель перехода плутония из раны в кровь разработана в соответствии с данными публикации №156 НКРЗ США [13], а также их модификации на основе данных по человеку [14].

Принципы формирования параметров внутреннего облучения при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы и их контроль аналогичен воздействию при остром ингаляционном поступлении. Схема выведения плутония при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема выведения из организма плутония при раневом поступлении

Fig. 2. Scheme of plutonium excretion from the body during intake through injured skin

При поступлении плутония через поврежденные кожные покровы активность плутония в биосубстратах обусловлена:

- поступлением из раны в кровь;
- транзитом плутония через кровь;
- выведением плутония от задержанного в органах депонирования с начала трудовой деятельности.

Поступление радионуклида из раны в кровь и лимфу и его дальнейшее перераспределение в организме приводит к облучению органов депонирования плутония для данного пути поступления – печени и клеток костной поверхности.

Составляющая активности, обусловленная транзитом плутония через ЖКТ и почки, не приводит к облучению органов депонирования плутония. При этом по альфа-активности биологических проб, взятых в различные сроки после раневого поступления, оценивается величина поступления радионуклида в кровь. Оценка доз облучения органов депонирования плутония при раневом поступлении проводится после прекращения транзита плутония через ЖКТ и кровь по активности плутония, выводимого из органов депонирования.

Рассмотрим примеры формирования ожидаемых эффективных доз, эквивалентных доз облучения органов депонирования плутония-239, а также рисков, сформированных этими дозами для трех сценариев поступления плутония в организм работника.

Сценарий 1. Хроническое ингаляционное поступление 1 Бк/сут (365 Бк/год) оксидов плутония-239 (тип растворимости «S» по МКРЗ 66 [15], АМАД=5 мкм в течение 50 лет, начиная с 20-летнего возраста.

Сценарий 2. Хроническое ингаляционное поступление 1 Бк/сут (365 Бк/год) нитратов плутония-239 (тип растворимости «М» по МКРЗ 66 [15], АМАД=5 мкм в течение 50 лет, начиная с 20-летнего возраста.

Сценарий 3. Однократное поступление через поврежденные кожные покровы в кровь 1 Бк плутония-239 в возрасте 20 лет.

Дозы облучения органов депонирования плутония

В работе [16] было показано, что годовые эквивалентные дозы альфа-излучения в органах основного депонирования плутония при его ингаляционном поступлении (печень, легкие, скелет) для сценариев 1 и 2, и органах вторичного депонирования (печень, скелет) для сценария 3 [17] за 50 лет после начала поступления, накапливаются согласно динамике, представленной на рис. 3–5.

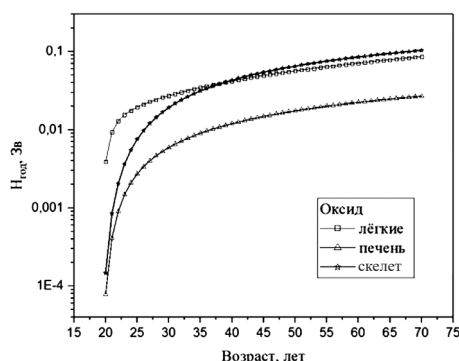


Рис. 3. Годовые эквивалентные дозы альфа-излучения легких, печени и скелета при хроническом ингаляционном поступлении оксида плутония по сценарию 1

Fig. 3. Annual equivalent doses of the lungs, liver and skeleton due to chronic inhalation of plutonium oxide according to scenario 1

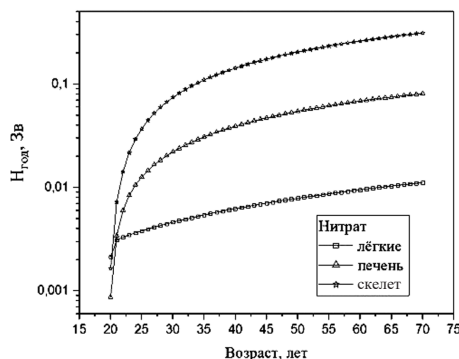


Рис. 4. Годовые эквивалентные дозы альфа-излучения легких, печени и скелета при хроническом ингаляционном поступлении нитрата плутония по сценарию 2

Fig. 4. Annual equivalent doses of the lungs, liver and skeleton due to chronic inhalation intake of plutonium nitrate according to scenario 2

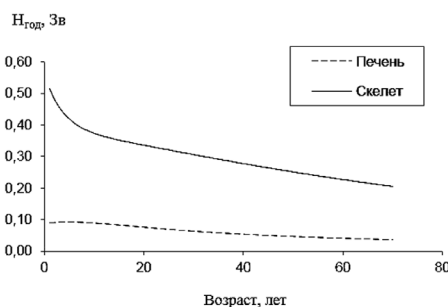


Рис. 5. Годовые эквивалентные дозы альфа-излучения печени и скелета при разовом поступлении плутония в кровь через поврежденные кожные покровы по сценарию 3

Fig. 5. Annual equivalent doses of the liver and skeleton with a single entry of plutonium into the blood through damaged skin according to scenario 3

При поступлении соединений плутония класса «S» (оксиды) наибольшему облучению подвергаются легкие и скелет. Максимальные годовые эквивалентные дозы на органы формируются на 50-ый год после начала поступления и составляют: $H_{50}^{\text{легк}} = 85$ мЗв/год, $H_{50}^{\text{скел}} = 104$ мЗв/год, а накопленные за 50 лет равны $\sum H_{1-50}^{\text{легк}} = 2,4$ Зв, $\sum H_{1-50}^{\text{скел}} = 2,7$ Зв.

При данном сценарии поступления годовая ожидаемая эффективная доза $OЭД_{\text{год}}$ по методологии НРБ-99/2009 будет постоянна на протяжении всех 50 лет и составит 5,5 мЗв/год.

При поступлении соединений плутония класса «М» (нитраты) наибольшему облучению подвергаются ККП и печень. Максимальные эквивалентные дозы формируются на 50-ый год после начала поступления и составляют: $\sum H_{50}^{\text{печ}} = 80$ мЗв/год, $H_{50}^{\text{скел}} = 310$ мЗв/год, а легкие только $H_{50}^{\text{легк}} = 11$ мЗв/год. Суммарные дозы за 50 лет составят: $\sum H_{1-50}^{\text{печ}} = 2,3$ Зв, $\sum H_{1-50}^{\text{скел}} = 8,5$ Зв, $\sum H_{1-50}^{\text{легк}} = 0,4$ Зв.

При поступлении по сценарию 2 годовая ожидаемая эффективная доза $OЭД_{\text{год}}$ по методологии НРБ-99/2009 будет постоянна на протяжении всех 50 лет и составит 17,2 мЗв/год.

При поступлении плутония через поврежденные кожные покровы облучению подвергаются только органы вторичного депонирования – печень и скелет.

Максимальные годовые эквивалентные дозы на органы депонирования при данном пути поступления формируются в первый год и составляют: $H^{\text{печ}} = 0,09$ мЗв и $H^{\text{ККП}} = 0,5$ мЗв. Накопленные за 50 лет по сценарию 3 дозы составят: $\sum H_{1-50}^{\text{печ}} = 3,5$ мЗв, $\sum H_{1-50}^{\text{скел}} = 16,5$ мЗв.

Величину $OЭД$ при раневом поступлении плутония оценить невозможно, поскольку в НРБ-99/2009 отсутствует дозовый коэффициент для данного пути поступления.

Показатели радиационного риска

Годовой избыточный риск, сформированный за счет облучения легких, печени и скелета при поступлении плутония по сценариям 1, 2, 3 представлен на рис. 6–8.

При облучении по сценарию 1 (рис. 6) максимальный годовой избыточный риск $ELR_{\text{год}}$ в зависимости от дозы и возраста, в котором эта доза была получена, составит: для легких $ELR_{60} = 1,4 \times 10^{-3}$, для печени $ELR_{\text{год}} = 7,7 \times 10^{-7}$, для скелета $ELR_{\text{год}} = 4,5 \times 10^{-8}$. Вклад в суммарный избыточный риск локализаций рака печени и скелета составляет 0,06 %. Фактически величина риска при точечной оценке обусловлена избыточным риском рака легкого. Как показано в работе [18], показатель ELR для случаев смерти от рака печени и скелета был определен со значительной неопределенностью, что связано с небольшим числом случаев смерти от новообразований этих органов в когорте работников ПО «Маяк». В этом случае неопределенность в оценке риска при определении степени связи возможных эффектов с радиационным воздействием у персонала, работающего с источниками ионизирующего излучения, должна толковаться в пользу человека. Для этого оценим величину годового избыточного риска ELR по верхней границе 99 % доверительного интервала величины избыточного относительного риска ERR/Gy (ИОР/Гр), т.е. по наиболее консервативной оценке возможного риска. При такой оценке вклад в суммарный годовой избыточный риск локализации рака легких при облучении по сценарию 1 составляет 98 %. Фактически, как и в случае точечной оценки, величина риска при поступлении плутония по сценарию 1 обусловлена раком легкого.

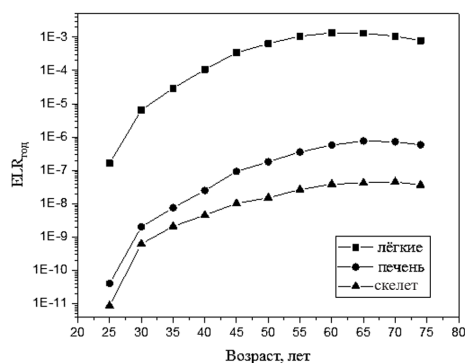


Рис. 6. Годовой избыточный риск (точечная оценка) при облучении легких, печени и скелета при поступлении оксида плутония по сценарию 1

Fig. 6. Annual excess risk (point assessment) for the lungs, liver and skeleton due to plutonium oxide intake according to scenario 1

Рассмотрим рассчитанную по модели [18] величину годового избыточного риска при облучении органов депонирования по сценарию 2 (рис. 7).

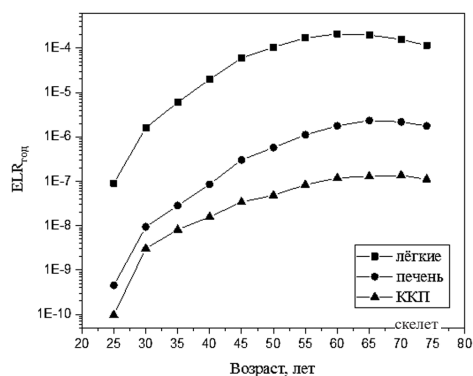


Рис. 7. Годовой избыточный риск (точечная оценка) при облучении легких, печени и скелета при поступлении нитрата плутония по сценарию 2

Fig. 7. Annual excess risk (point assessment) for the lungs, liver and skeleton due to plutonium nitrate intake according to scenario 2

При этом точечная оценка максимального $ELR_{год}$ в зависимости от дозы и возраста, в котором эта доза была получена, составит:

$$ELR_{60}^{легк} = 2,1 \times 10^{-4}$$

$$ELR_{65}^{печ} = 2,4 \times 10^{-6}$$

$$ELR_{70}^{скел} = 1,4 \times 10^{-7}$$

$$\sum ELR_{60}^{макс} = 2,11 \times 10^{-4}$$

Вклад в суммарный годовой избыточный риск локализаций раков печени и скелета по точечной оценке составит: печень – 0,84 %, скелет – 0,06 %.

Однако при расчете показателей риска по верхней границе 99 % интервала ERR/Gy максимальные значения годового избыточного риска при облучении органов депонирования плутония по сценарию 2 составят:

$$ELR_{60}^{легк} = 3,2 \times 10^{-4}$$

$$ELR_{70}^{печ} = 2,3 \times 10^{-4} \quad \sum ELR = 6,0 \times 10^{-4}$$

$$ELR_{70}^{скел} = 3,1 \times 10^{-5}$$

Вклад в ELR : $ELR_{легк}$ – 55 %, $ELR_{печ}$ – 40 %, $ELR_{скел}$ – 5 %.

Сумма рисков заболеваний печени и скелета составит почти половину величины суммарного риска. При

этом величина избыточного риска заболеваний легкого сопоставима с риском рака печени, поэтому учитывая, что доза облучения печени в 7 раз превышает дозу облучения легкого, критическим органом при ингаляции нитратов плутония является печень.

Радиационный риск при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы формируется за счет облучения печени и скелета. В связи с этим оценку годового избыточного риска при поступлении плутония по сценарию 3 необходимо проводить по верхней границе 99 % доверительного интервала ERR/Gy . Годовой избыточный риск $ELR_{год}$ для локализаций рака печени и скелета при раневом поступлении плутония по сценарию 3 показан на рис. 8.

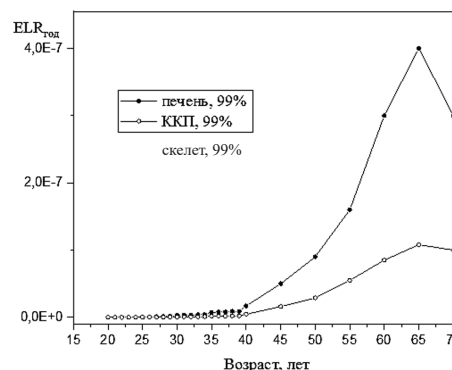


Рис. 8. Показатели годового приращения пожизненного избыточного риска смерти от рака печени и скелета, рассчитанные по верхней границе 99 % доверительного интервала ERR/Gy при поступлении из раны в кровь 1 Бк плутония-239 по сценарию 3

Fig. 8. Indicators of the annual increment of the lifetime excess risk of death from liver and skeletal cancer, calculated at the upper limit of the 99 % confidence interval ERR/Gy due to 1 Bq of plutonium-239 enters the blood from the wound according to scenario 3

Максимальная величина $ELR_{год}$ для рака печени и скелета составляет:

$$ELR_{65}^{печ} = 4,3 \times 10^{-7}$$

$$ELR_{65}^{скел} = 6,6 \times 10^{-8}$$

Суммарный риск составит: $\sum ELR = 4,9 \times 10^{-7}$.

Исходя из полученных данных, критическим органом при поступлении плутония через поврежденную кожу является печень.

Следует отметить, что полученные оценки являются наиболее консервативными (т.е. заведомо завышенными) оценками возможного радиационного риска.

Оценки параметров облучения при допустимых уровнях риска

Рассмотрим какие параметры доз облучения критических органов и величины поступления плутония в организм персонала сформируют радиационный риск, не превышающий величину допустимого социально приемлемого риска $1 \times 10^{-3}/год$.

Максимальный суммарный годовой избыточный риск, равный 1×10^{-3} , для хронического ингаляционного поступления оксида плутония, начиная с 20-летнего возраста, формируется при $\Pi = 260$ Бк (рис. 9). При таком ритме поступления максимальная доза на легкие будет сформирована на 50-ый год облучения и составит:

$$H_{50}^{легк} = 60 \text{ мЗв/год}$$

$$\sum H_{1-50}^{легк} = 1,8 \text{ Зв}$$

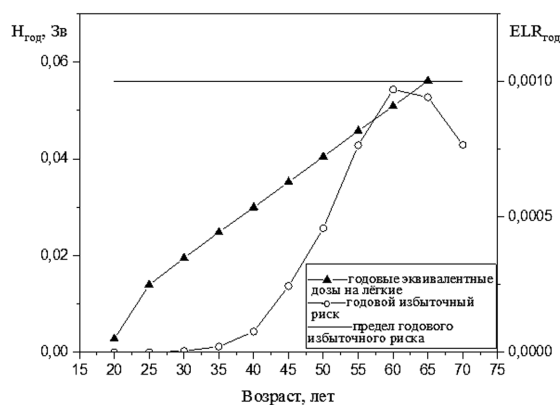


Рис. 9. Годовые дозы облучения легких и формируемый при этом годовой избыточный риск для случая хронического ингаляционного поступления оксида плутония-239 на уровне 260 Бк/год

Fig. 9. Annual doses of the lungs and the resulting annual excess risk for the case of chronic inhalation intake of plutonium-239 oxide at the level of 260 Bq/year

Ожидаемая за 50 лет эффективная доза при таком ритме поступления по методологии НРБ-99/2009 будет равна:

$E_{\text{год}} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ Зв/Бк} \times 260 \text{ Бк/год} = 3,9 \text{ мЗв/год} = \text{const}$ на протяжении всех 50 лет. Годовой избыточный риск, соответствующий такой ожидаемой эффективной дозе $E_{\text{год}}$, составит: $ELR_{\text{год}} = 0,2 \times 10^{-3} = \text{const}$ на протяжении 50 лет.

На рис. 10 представлены параметры суммарного годового избыточного риска, рассчитанные по верхней границе 99 % доверительного интервала ERR/Gy при хроническом ингаляционном поступлении нитрата плутония, начиная с 20-летнего возраста при ежегодном поступлении в организм 610 Бк/год. При таком ритме поступления максимальная доза на печень будет сформирована на 50-ый год облучения и составит: $H_{50}^{\text{печ}} = 135 \text{ мЗв/год}$, $\sum H_{1-50}^{\text{печ}} = 3,9 \text{ Зв}$. Ожидаемая эффективная доза по методологии НРБ-99/2009 будет равна: $E_{\text{год}} = 4,7 \times 10^{-5} \text{ Зв/Бк} \times 610 \text{ Бк} \sim 30 \text{ мЗв/год} = \text{const}$ на протяжении всех 50 лет, а формируемый этой дозой годовой избыточный риск составит $ELR_{\text{год}} = 1,5 \times 10^{-3} = \text{const}$ на протяжении 50 лет.

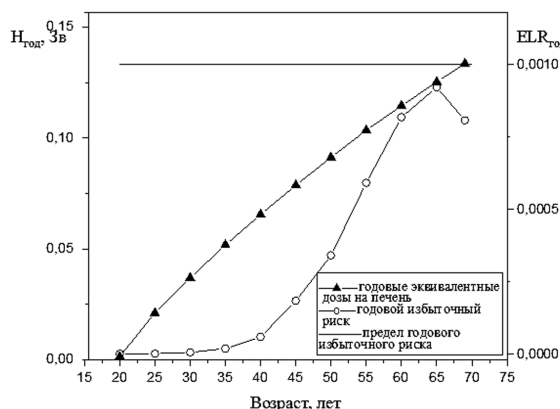


Рис. 10. Годовые дозы облучения печени и формируемый при этом суммарный годовой избыточный риск (99 % доверительный интервал ERR/Gy) для случая хронического ингаляционного поступления нитрата плутония на уровне 610 Бк/год

Fig. 10. Annual doses of liver and the resulting total annual excess risk (99 % confidence interval ERR/Gy) for the case of chronic inhalation intake of plutonium nitrate at the level of 610 Bq/year

Максимальный суммарный годовой избыточный риск (печень, скелет), равный 1×10^{-3} , будет сформирован при разовом поступлении в кровь через поврежденные кожные покровы 2000 Бк плутония в 20-летнем возрасте (рис. 11).

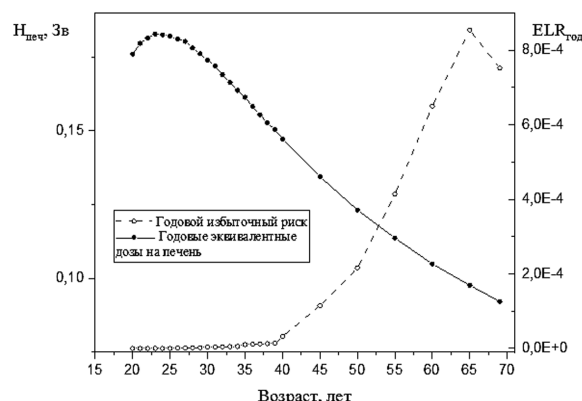


Рис. 11. Годовые дозы облучения печени и формируемый суммарный годовой избыточный риск при разовом поступлении в кровь 2000 Бк плутония

Fig. 11. Annual doses of liver and the resulting total annual excess risk with a single intake of 2000 Bq of plutonium into the blood

При этом максимальная доза на печень формируется в первые годы после раневого поступления и составляет $H_{\text{год}}^{\text{печ}} = 180 \text{ мЗв}$, а $\sum H_{1-50}^{\text{печ}} = 4,9 \text{ Зв}$. Однако, если раневое поступление случится в 65 лет, предельный риск 1×10^{-3} будет достигнут при разовом поступлении в кровь 1100 Бк плутония.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных в исследовании данных позволяет сделать ряд заключений, связанных с нормированием внутреннего облучения при поступлении плутония. Величина радиационного риска, формируемого при облучении от инкорпорированного плутония, зависит не только от дозы облучения органов депонирования нуклида, но и от возраста, в котором эта доза была получена.

ОЭД, оцененная по методологии рекомендаций МКРЗ-60 [19] и НРБ-99/2009, не только не дает представления о реальных уровнях облучения персонала при различных сценариях поступления плутония, но и приводит к результатам, которые при нормировании предела годового поступления (ППП_{перс}) не соответствуют пределу годового избыточного риска. ОЭД не зависит от дозы облучения органов депонирования и возраста работника, которые влияют на значение радиационно-обусловленного риска. Все эти обстоятельства на наш взгляд не позволяют использовать ОЭД в качестве нормируемой величины при контроле доз от хронического поступления плутония.

Так, при хроническом поступлении оксида плутония на уровне ППП_{перс} (1300 Бк/год по НРБ-99/2009 [1]), начиная с 20-летнего возраста, величина годового избыточного риска превысит величину 1×10^{-3} в 45 лет, при этом продолжительность последующей жизни работника достаточна для развития онкологического заболевания. В возрасте 60 лет допустимая величина будет превышена в 5 раз.

При хроническом ингаляционном поступлении нитрата плутония на уровне 430 Бк/год (уровень поступления нитрата плутония, формирующий ожидаемую

эффективную дозу $OЭД=20$ мЗв/год по методологии НРБ-99/2009 [1]), максимальная величина годового избыточного риска составит $ELR_{60} = 7,1 \times 10^{-4}$, что в 1,4 раза меньше социально приемлемого риска.

Для случаев поступления плутония через поврежденные кожные покровы допустимые уровни воздействия в рекомендациях МКРЗ и российских НРБ отсутствуют несмотря на то, что данный путь поступления является одним из наиболее значимых в современных условиях.

Годовой избыточный риск зависит также и от возраста, в котором начался контакт работника с плутонием. В работе [16] была представлена зависимость годового избыточного риска от возраста при хроническом ингаляционном поступлении 290 Бк/год оксида плутония, которое начинается в возрасте 20, 30, 40 и 50 лет (рис. 12).

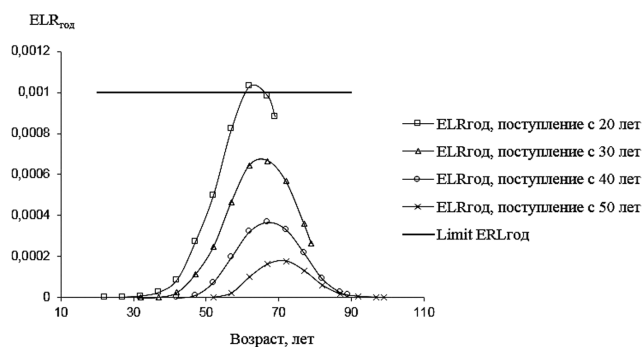


Рис. 12. Годовой избыточный риск при хроническом ингаляционном поступлении оксида плутония-239 на уровне 290 Бк/год, начиная с 20, 30, 40 и 50-летнего возраста

Fig. 12. Annual doses of liver and the resulting total annual excess risk with a single intake of 2000 Bq of plutonium into the blood

Если при начале контакта работника с плутонием в возрасте 20 лет максимальное значение $ELR_{год} = 1 \times 10^{-3}$, то при начале контакта работника с плутонием в возрасте 50 лет, $ELR_{год}$ в 5 раз меньше и составляет 2×10^{-4} . Возраст, при котором достигается максимальная величина годового избыточного риска, при этом увеличивается с 60 до 70 лет.

Как было показано выше, при увеличении возраста работника, в котором произошел случай раневого поступления плутония, при одинаковом уровне поступления величина радиационно-обусловленного риска возрастает. При разовом поступлении через поврежденные кожные покровы 2000 Бк плутония в кровь в 20-летнем возрасте $ELR_{год} = 1 \times 10^{-3}$, а в возрасте 65 лет $ELR_{год} = 1,8 \times 10^{-3}$. Таким образом, только величина годового избыточного риска, оцененная для реальных условий облучения, может служить основой нормирования для различных путей поступления плутония.

Однако, контроль годовых доз облучения органов депонирования плутония и поддержание этих доз ниже определенного уровня для различных сценариев поступления плутония гарантирует не превышение принятого значения социально приемлемого риска.

По величине годовых доз органов депонирования плутония может быть рассчитана и годовая эффективная доза $E_{год}$ за счет внутреннего облучения от поступления плутония, а по ее величине – и годового избыточный

риск. Однако взвешивающие тканевые множители органов депонирования плутония при оценке эффективной дозы будут также в широких пределах зависеть от возраста работника, для которого были получены эти дозы. Кроме этого, при переходе от эффективной дозы к величине радиационного риска коэффициент риска (r_E) также будет зависеть от возраста.

При радиационном контроле параметры внутреннего облучения от поступления плутония оцениваются биофизическим методом. По активности плутония в суточной порции мочи (кала) можно оценить величину поступления плутония, а также его содержание в органах депонирования. При этом дозы облучения органов депонирования напрямую связаны с содержанием плутония в организме (критических органах).

Закключение

Из представленных материалов следует, что из-за особенностей метаболизма плутония величина радиационного риска, сформированного за счет облучения органов депонирования при поступлении плутония, не зависит от величины ожидаемой за 50 лет эффективной дозы E_{50} . Величина E_{50} не отражает также фактических уровней облучения работников, так как не зависит от доз облучения органов депонирования, а зависит только от величины поступления за год контроля, которую при хроническом поступлении измерить существующими методами невозможно. В связи с этим, нормирование облучения от плутония по величине ожидаемой за 50 лет эффективной дозы некорректно.

Нормирование воздействия при поступлении плутония возможно только по величине годового избыточного риска, который за любой год контроля (или воздействия плутония после прекращения контроля) не должен превышать 1×10^{-3} (риск-ориентированный подход к нормированию).

В качестве допустимых уровней монофакторного воздействия для ограничения $ELR_{год}$ до установленного предела могут применяться 2 показателя:

- годовая эффективная доза облучения при поступлении плутония;
- годовые эквивалентные дозы облучения критических органов при различных сценариях поступления плутония.

При этом годовые эквивалентные дозы критических органов могут быть рассчитаны по активности плутония в биосубстратах (моча, кал) при биофизическом методе контроля. Переход от годовой эквивалентной дозы критических органов к величине годового избыточного риска должен проводиться с учетом возраста работника, в котором эта доза была получена.

При расчете годовой эффективной дозы по результатам контроля годовой эквивалентной дозы необходимо учитывать зависимость взвешивающих коэффициентов для органов депонирования плутония от возраста работника, в котором произошло облучение, а при оценке величины радиационного риска – зависимость коэффициента риска от возраста.

Данный подход к нормированию может быть использован при остром и хроническом ингаляционном поступлении плутония, а также при поступлении плутония через поврежденные кожные покровы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
2. IAEA Safety Standards Series No. GSR. Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna, 2011. 303 p.
3. ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. Publication 103 // Ann. ICRP. 2007. V.37, No. 2-4. P. 1-332.
4. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V., Kreslov V.V., Bolotnikova M.G., Sokolnikov M.E., Khokhriakov V.F., Suslova K.G., Vassilenko E.K., Romanov S.A. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex // Radiat. Res. 1999. No. 152. P. 352-363.
5. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E., Schonfeld S., Koshurnikova N. Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948-2008 // PLoS One. 2015. No. 10. P. e0117784.
6. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L., Ron E., Shilnikova N.S., Khokhryakov V.V., Vassilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung, Liver and Bone Cancer Mortality in Mayak Workers // Int. J. Cancer. 2008. No. 123. P. 905-911.
7. Koshurnikova N.A., Gilbert E.S., Sokolnikov M., Khokhryakov V.F., Miller S., Preston D.L., Romanov S.A., Shilnikova N.S., Suslova K.G., Vostrotin V.V. Bone Cancers in Mayak Workers // Radiat. Res. 2000. No. 154. P. 237-245.
8. Gilbert E.S., Koshurnikova N.A., Sokolnikov M., Khokhryakov V.F., Miller S., Preston D.L., Romanov S.A., Shilnikova N.S., Suslova K.G., Vostrotin V.V. Liver Cancers in Mayak Workers // Radiat. Res. 2000. No. 154. P. 246-252.
9. Gilbert E.S., Sokolnikov M., Preston D.L., Schonfeld S.J., Schadilov A.E., Vassilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung Cancer Risks from Plutonium: an Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort // Radiat. Res. 2013. No. 179. P. 332-342.
10. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington: Hirosoft International Corporation, 1993.
11. Thomas D., Darby S., Fagnani F., Hubert P., Vaeth M., Weiss K. Definition and Estimation of Lifetime Detriment from Radiation Exposures: Principles and Methods // Health Physics. 1992. No. 63. P. 259-272.
12. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotin V.V., Vvedensky V.E., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Birchall A., Miller S., Schadilov A.E., Ephimov A.V. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine // Health Phys. 2013. No. 104. P. 366-378.
13. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment: Recommendation of the Nationale Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 156 // NCRP. 2007. 411 p.
14. Щадилов А.Е. Контроль поступления актинидов в организм персонала ПО «Маяк» через поврежденные кожные покровы // Источники и эффекты облучения работников ПО «Маяк» и населения, проживающего в зоне влияния предприятия. Сборник трудов ЮУрИБФ. Ч.1. Озерск: ФМБА, ФГУП ЮУрИБФ, 2009. С. 101-133.
15. ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66 // Ann. ICRP. 1994. V.24, No. 1-3.
16. Василенко Е.К., Сокольников М.Э., Востротин В.В., Ефимов А.В., Аладова Е.Е., Романов С.А. Ограничение профессионального облучения при ингаляционном поступлении плутония // Радиация и риск. 2015. Т.24, № 3. С. 51-58.
17. Сокольников М.Э., Василенко Е.К., Юркин А.М., Востротин В.В., Ефимов А.В., Аладова Е.Е. Нормирование радиационного воздействия ^{239}Pu при поступлении через поврежденные кожные покровы // Радиация и риск. 2016. Т.25, № 2. С. 109-118.
18. Сокольников М.Э., Востротин В.В., Ефимов А.В., Василенко Е.К., Романов С.А. Пожизненный риск смерти от рака легкого при различных сценариях ингаляционного поступления ^{239}Pu // Радиация и риск. 2015. Т.24, № 3. С. 59-69.
19. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. Publication 60 // Ann. ICRP. 1991. V.21, No. 1-3.

REFERENCES

1. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-Epidemiological Rules and Standards. Moscow Publ., 2009. 100 p. (In Russ.).
2. IAEA Safety Standards Series No. GSR. Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna, 2011. 303 p.
3. ICRP, 2007. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. Publication 103. Ann. ICRP. 2007;37;2-4:1-332.
4. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V., Kreslov V.V., Bolotnikova M.G., Sokolnikov M.E., Khokhriakov V.F., Suslova K.G., Vassilenko E.K., Romanov S.A. Characteristics of the Cohort of Workers at the Mayak Nuclear Complex. Radiat. Res. 1999;152:352-363.
5. Sokolnikov M., Preston D., Gilbert E., Schonfeld S., Koshurnikova N. Radiation Effects on Mortality from Solid Cancers other than Lung, Liver, and Bone Cancer in the Mayak Worker Cohort: 1948-2008. PLoS One. 2015;10:e0117784.
6. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L., Ron E., Shilnikova N.S., Khokhryakov V.V., Vassilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung, Liver and Bone Cancer Mortality in Mayak Workers // Int. J. Cancer. 2008. No. 123. P. 905-911.
7. Koshurnikova N.A., Gilbert E.S., Sokolnikov M., Khokhryakov V.F., Miller S., Preston D.L., Romanov S.A., Shilnikova N.S., Suslova K.G., Vostrotin V.V. Bone Cancers in Mayak Workers. Radiat. Res. 2000;154:237-245.
8. Gilbert E.S., Koshurnikova N.A., Sokolnikov M., Khokhryakov V.F., Miller S., Preston D.L., Romanov S.A., Shilnikova N.S., Suslova K.G., Vostrotin V.V. Liver Cancers in Mayak Workers. Radiat. Res. 2000;154:246-252.
9. Gilbert E.S., Sokolnikov M., Preston D.L., Schonfeld S.J., Schadilov A.E., Vassilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung Cancer Risks from Plutonium: an Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort. Radiat. Res. 2013;179:332-342.
10. Preston D.L., Lubin J.H., Pierce D.A., McConney M.E. Epicure Users Guide. Seattle, Washington, Hirosoft International Corporation, 1993.
11. Thomas D., Darby S., Fagnani F., Hubert P., Vaeth M., Weiss K. Definition and Estimation of Lifetime Detriment from Radiation Exposures: Principles and Methods. Health Physics. 1992;63:259-272.
12. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotin V.V., Vvedensky V.E., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Birchall A., Miller S., Schadilov A.E., Ephimov A.V. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine. Health Phys. 2013;104:366-378.
13. Development of a Biokinetic Model for Radionuclide-Contaminated Wounds and Procedures for their Assessment, Dosimetry and Treatment: Recommendation of the Nationale Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 156. NCRP. 2007. 411 p.
14. Shchadilov A.Ye. Monitoring for Actinide Intakes Through Injured Skin in Mayak PA Workers. *Istochniki i Effekty Oblucheniya Rabotnikov PO «Mayak» i Naseleniya, Prozhivayushchego v Zone Vliyaniya Predpriyatiya* = Radioactive Sources and Radiation Effects on the Mayak PA Workers and Population Living in the Area of Nuclear Facility Influence. Collection of SUBI writings. Ozyorsk Publ. 2009. P. 94-126 (In Russ.).
15. ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP. 1994;24;1-3.
16. Vassilenko Ye.K., Sokolnikov M.E., Vostrotin V.V., Yefimov A.V., Aladova Ye.Ye., Romanov S.A. Limiting Occupational Exposure Due to Plutonium Inhalation Intake. *Radiatsiya i Risk* = Radiation and Risk. 2015;24;3:51-58 (In Russ.).
17. Sokolnikov M.E., Vassilenko Ye.K., Yurkin A.M., Vostrotin V.V., Yefimov A.V., Aladova Ye.Ye. Limit on Intake of ^{239}Pu in a Human Body Through Wound. *Radiatsiya i Risk* = Radiation and Risk. 2016;25;2:109-117 (In Russ.).
18. Sokolnikov M.E., Vostrotin V.V., Yefimov A.V., Vassilenko Ye.K., Romanov S.A. Estimates of Lifetime Risk of Lung Cancer Death Under Different Scenarios of ^{239}Pu Inhalation. *Radiatsiya i Risk* = Radiation and Risk. 2015;24;3:59-70 (In Russ.).
19. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP. Publication 60. Ann. ICRP. 1991;21;1-3.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного контракта № 11.306.22.2 по теме «Решение актуальных вопросов внутренней дозиметрии персонала и населения» (шифр «Радиометрия-22»), финансируемого ФМБА России.

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 work was carried out within the framework of state contract No. 11.306.22.2 «Solving of the relevant issues of internal dosimetry for personnel and population» (code «Radiometry-22»), funded by the FMBA of Russia.

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

Article received: 20.07.2022. **Accepted for publication:** 25.09.2022.