

И.С. Кузнецова, М.Э. Сокольников, А.В. Ефимов, А.Б. Соколова

ПОЖИЗНЕННЫЙ РИСК СМЕРТИ ОТ РАКА ЛЕГКОГО ПРИ ИНГАЛЯЦИОННОМ ПОСТУПЛЕНИИ ПЛУТОНИЯ С УЧЕТОМ НОВЫХ БИОКИНЕТИЧЕСКОЙ И ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики, Озёрск

Контактное лицо: И.С. Кузнецова, e-mail: kuznetsova@subi.su

РЕФЕРАТ

Цель: Оценить пожизненный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении соединений ^{239}Pu типа П, М и МОКС на основе результатов моделирования смертности в когорте работников ПО «Маяк» с учетом новых биокинетической и дозиметрической моделей.

Материал и методы: Пожизненный риск был оценен в терминах показателя пожизненной радиационно-индуцированной смерти от рака легкого. Оценка риска проводилась для сценария хронического ежедневного поступления в течение одного года, 10, 20, 30 и 50 лет при трех значениях возраста на начало контакта с аэрозолями плутония: 20, 35 и 50 лет. Были использованы две величины поступления, равные 1 Бк в день и пределы годового поступления (ПГП), полученные на основании OIR-модели (the Occupational Intakes of Radionuclides) для ^{239}Pu . Оценки эквивалентных доз в легких от ^{239}Pu выполнялись на основании биокинетической и дозиметрической моделей, приведенных в серии публикаций OIR.

Для оценки пожизненного радиационного риска использовалась модель смертности от рака легкого, полученная в рамках оценки радиогенного риска у персонала ПО «Маяк». Поскольку имеется фактор избыточного риска в виде профессионального радиационного воздействия, в функции дожития показатель смертности также имеет радиогенную составляющую.

Результаты: Показана возможность превышения предела по показателю пожизненного риска смерти от рака легкого для ингаляционного поступления соединений ^{239}Pu типа М и МОКС. Поступление соединений ^{239}Pu типа М на уровне ПГП, составляющем 650 Бк в год, в течение 50 лет, начиная с возраста 20 лет приводит к накоплению в легком 516 мГр дозы альфа-излучения и к двукратному превышению уровня 5 % пожизненного риска для курящих мужчин ($9,8 \cdot 10^{-2}$). Рекомендованный ПГП для МОКС-соединений (440 Бк в год) приводит к превышению предела приемлемого риска при поступлении в течение 20, 30 и 50 лет: $5,7 \cdot 10^{-2}$, $7,1 \cdot 10^{-2}$, $7,9 \cdot 10^{-2}$ соответственно, при условии начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu в 20-летнем возрасте курящих мужчин.

Ключевые слова: пожизненный риск смерти, профессиональное облучение, плутоний, рак легкого

Для цитирования: Кузнецова И.С., Сокольников М.Э., Ефимов А.В., Соколова А.Б. Пожизненный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении плутония с учетом новых биокинетической и дозиметрической моделей // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 71–77. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-71-77

I.S. Kuznetsova, M.E. Sokolnikov, A.V. Efimov, A.B. Sokolova

Lifetime Risk of Lung Cancer Death from Inhaled Plutonium Intake Based on New Biokinetic and Dosimetric Models

South Ural Federal Scientific and Clinical Center for Medical Biophysics, Ozersk, Russia

Contact person: I.S. Kuznetsova, e-mail: kuznetsova@subi.su

ABSTRACT

Purpose: To assess the lifetime risk of death from lung cancer with inhaled intake of ^{239}Pu compounds of the M, S and MOX types, based on the results of mortality modeling in a cohort of employees at PA Mayak, taking into account new biokinetic and dosimetric models.

Material and methods: Lifetime risk was assessed in terms of lifetime radiation death from lung cancer.

The risk assessment was carried out for the scenario of chronic daily intake for one year, 10, 20, 30 and 50 years with three age values at the beginning of contact with plutonium aerosols: 20, 35 and 50 years. Two intake values were used, equal to 1 Bq per day and annual limit of intake (ALI), obtained based on the OIR model (the Occupational Intakes of Radionuclides) for ^{239}Pu . Estimates of equivalent doses to the lungs from ^{239}Pu were made based on the biokinetic and dosimetric models presented in the OIR publication series.

To assess the lifetime radiation risk, a model of lung cancer mortality was used, obtained as part of the radiogenic risk studies for Mayak personnel. Since there is an excessive risk factor – occupational radiation exposure, the mortality rate also takes into account the radiogenic component in the survival function.

Results: The possibility of exceeding the limit in terms of lifetime risk of death from lung cancer for inhaled intake of chemical compounds ^{239}Pu type M and MOX has been shown. The intake of ^{239}Pu type M compounds at a ALI level of 650 Bq per year for 50 years, starting at the age of 20, leads to an accumulation of 516 mGy of alpha radiation dose in the lung and to a twofold excess of the lifetime risk 5 % level for male smokers ($9,8 \cdot 10^{-2}$). The recommended ALI for MOX compounds (440 Bq per year) leads to exceeding the acceptable risk limit within 20, 30 or 50 years: $5,7 \cdot 10^{-2}$, $7,1 \cdot 10^{-2}$, $7,9 \cdot 10^{-2}$, if smoking men start coming into contact with ^{239}Pu aerosols at the age of 20.

Keywords: lifetime death risk, occupational exposure, plutonium, lung cancer

For citation: Kuznetsova IS, Sokolnikov ME, Efimov AV, Sokolova AB. Lifetime Risk of Lung Cancer Death from Inhaled Plutonium Intake Based on New Biokinetic and Dosimetric Models. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(6):71–77. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-71-77

Введение

Основные принципы обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации объектов использования атомной энергии сформулированы в п. 2.1 «Норм радиационной безопасности» НРБ-99/2009 [1]. Принцип нормирования – не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения – основан на признании в качестве приемлемого уровня пожизненного риска смерти в результате техногенного облучения в условиях нормальной эксплуатации радиационных объектов, равного 0,05.

Установленный в НРБ предел эффективной дозы основан на результатах моделирования оценки радиогенного риска в когорте LSS. Применение моделей зависимости риска от дозы внешнего гамма-нейтронного излучения к условиям внутреннего альфа-облучения плутонием, периоды полураспада и выведения которого значительно превышают длительность жизни человека, связано со значительными неопределенностями и допущениями. Поэтому при нормировании поступления плутония в организм работников в процессе их профессиональной деятельности необходимо учитывать результаты прямых оценок радиогенного риска.

Цель работы – оценить пожизненный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении соединений ^{239}Pu с учетом различных значений транспортабельности на основе результатов моделирования смертности в когорте работников ПО «Маяк» с использованием новых биокинетической и дозиметрической моделей.

Материал и методы

Оценка пожизненного риска смерти при ингаляционном поступлении плутония включает следующие этапы:

- оценка дозы радиационного воздействия при однократном поступлении нуклида различных по транспортабельности соединений;
- выбор сценариев поступления;
- оценка избыточного абсолютного риска смерти от рака легкого;
- оценка функции дожития;
- оценка показателя пожизненной избыточной радиационной смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении ^{239}Pu .

Значения эквивалентных доз на легкие от ^{239}Pu были получены на основании биокинетической и дозиметрической моделей, приведенных в серии публикаций OIR (the Occupational Intakes of Radionuclides), включающей Публикации 130, 134, 137, 141 МКРЗ (далее OIR-модели) [2–5]. В Публикации 130 МКРЗ представлена модифицированная модель дыхательного тракта, предложенная вместо модели Публикации 66 МКРЗ [2, 6]. Основные характеристики модели остались неизменными, при этом большая часть изменений коснулась механического клиренса частиц.

Пересмотренные данные по ингаляции, заглатыванию, системной биокинетике для плутония представлены в Публикации 141 МКРЗ, в которой опубликованы обновленные значения параметров для соединений плутония, в том числе добавлены новые формы соединений – наночастицы, МОКС-соединения [5].

Модель желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) Публикации 30 МКРЗ [7] заменена на модель, представленную в Публикации 100 МКРЗ [8]. В отличие от модели Публикации 30 МКРЗ, новая модель рассматривает все области ЖКТ, включая пищевод и полость рта, введены новые камеры стенок органов ЖКТ с возможным поглощением и выведением в кровеносное русло.

Пределы годового поступления (ПГП), полученные на основании OIR-модели для ^{239}Pu , приведены в табл. 1.

Таблица 1

ПГП для соединений ^{239}Pu с АМАД 1мкм
PGP for ^{239}Pu compounds with AMAD 1µm

Радионуклид	Тип химического соединения при ингаляции	ПГП _{ПЕРС} Бк в год
^{239}Pu	тип П	$8,0 \times 10^2$
	тип М	$6,5 \times 10^2$
	МОКС	$4,4 \times 10^2$

На основании вышеуказанных моделей были выполнены расчеты значений годовых эквивалентных доз на легкие (в Зв) на период 70 лет для соединений типа П (промежуточные), М (медленные) и МОКС-соединений с АМАД 1 мкм. Расчеты проведены для стандартного работника (мужчины), фактор курения применяемая модель биокинетики не учитывает.

Оценка риска проводилась для сценария хронического ежедневного ингаляционного поступления соединений ^{239}Pu в течение одного года, 10, 20, 30 и 50 лет. Рассматривалось две величины поступления: равная 1 Бк в сутки и равная $1/365 \times \text{ПГП}$ в сутки для соответствующего типа соединений. Обоснованием выбора численных значений длительности поступления является наблюдаемое в субкогорте работников ПО «Маяк», нанятых в период нормальной эксплуатации производства, распределение численности работников по длительности работы, представленное в табл. 2 [9]: около 30 % лиц были уволены через 5–20 и 20–40 лет, чуть меньше доля лиц с коротким (менее 5 лет) периодом длительности работы – 22,8 %, более 40 лет числились в штате 12,7 % работников.

Таблица 2

Количественный состав субкогорты работников ПО «Маяк», нанятых в 1959–1982 гг. по длительности работы на производстве
The quantitative composition of the subcohort of Mayak employees hired in 1959–1982 by the duration of their work in production

Длительность работы на ПО «Маяк», годы	Количество работников
Менее 5 лет	2730 (22,8 %)
5–20 лет	3572 (29,9 %)
20–40 лет	4143 (34,6 %)
40 и более лет	1520 (12,7 %)
Медиана, годы	18,0
Общее количество работников в субкогорте	11965

Кроме того, были выбраны три величины возраста на начало контакта с аэрозолями плутония: 20, 35 и 50 лет. Обоснованием выбора является наблюдаемое распределение численности работников ПО «Маяк» по возрасту на момент начала работы на производстве, представленное в табл. 3 [9]: около половины работников (45,6 %) были наняты в возрасте до 20 лет, более трети (36,5 %) в возрасте 20–30 лет, доля лиц, нанятых в возрасте от 30 до 54 лет, составляет 17,6 %, единицы были приняты в штат предприятия в возрасте 55 лет и более. Сценарии были применены для соединений каждого типа.

Проводимые исследования по оценке радиогенного риска ЗНО среди работников ПО «Маяк» свидетельствуют об избыточной частоте рака легкого, печени и скелета среди лиц, контактировавших с аэрозолями ^{239}Pu [10]. В то же время не найдено убедительных доказательств зависимости заболеваемости/смертности от солидных ЗНО других локализаций и ЗНО кроветворной и лимфатической системы от уровня альфа-облучения инкорпо-

Таблица 3

Количественный состав субкогорты работников ПО «Маяк», нанятых в 1959–1982 гг. по возрасту найма на производство
Quantitative composition of the subcohort of Mayak employees hired in 1959–1982 by age of hire for production

Возраст найма	Количество работников
< 20 лет	5462 (45,6 %)
20–29 лет	4372 (36,5 %)
30–54 лет	2107 (17,6 %)
55 и более лет	24 (0,2 %)
Медианный возраст, лет	20,8
Диапазон возрастов, лет	14–69
Общее количество работников в субкогорте	11965

рированным ^{239}Pu [11, 12]. В работе [13] показано, что в когорте работников ПО «Маяк» 1948–1982 гг. найма из 239,3 случаев смерти от ЗНО органов основного депонирования ^{239}Pu , отнесенных к радиационно-индуцированным, только четверть – раки печени и скелета. Более того, отмечается, что при ограничении диапазона доз до 3 Гр и 10 Гр оценки избыточного радиогенного риска ЗНО печени и скелета, соответственно, статистически незначимо отличался от нуля. Поэтому при оценке пожизненного радиационного риска при уровнях ингаляционного поступления ^{239}Pu , сопоставимых с предельно допустимыми, в отсутствие внешнего гамма-облучения, для оценки абсолютного радиационного риска использовалась модель (формула 1) смертности от рака легкого с избыточным относительным риском, зависящим от дозы альфа-излучения:

$$\mu(g, a, s, d_\gamma, d_\alpha, sur_\alpha) = \mu_0(g, a, s) \times [1 + \text{ИОР}(d_\gamma, d_\alpha, sur_\alpha, a)], \quad (1)$$

где μ – смертность от рака легкого (на 1 человеко-год наблюдения), μ_0 – смертность от рака легкого при отсутствии фактора профессионального облучения (на 1 человеко-год наблюдения), g – пол, a – достигнутый возраст (лет), s – статус курильщика, d_γ – накопленная к возрасту a поглощенная в легком доза гамма-излучения с лагом 5 лет (Гр), d_α – накопленная к возрасту a поглощенная в легком доза альфа-излучения с лагом 5 лет (Гр) для лиц, прошедших биофизическое обследование, sur_α – индикатор уровня радиационного воздействия ^{239}Pu для лиц, не прошедших биофизическое обследование.

Значения параметров модели получены в исследовании рака легкого в когорте работников ПО «Маяк» [14].

Параметры модели избыточного относительного риска, связанные с поступлением и накоплением ^{239}Pu в легком, приведены в табл. 4. Аналогичная модель использовалась при оценке пожизненного риска в работе [15].

Таблица 4

Параметры модели
избыточного относительного риска смерти от рака [14]
Model parameters
for the excess relative risk of death from cancer [14]

Параметр	Оценка	95 % доверительный интервал
Коэффициент избыточного относительного риска на 1 Гр дозы от ^{239}Pu в легком к возрасту 60 лет (ИОР/Гр)	7,4	5,0; 11
Изменение ИОР/Гр с возрастом	-3,1	-5,4; -0,8

Доля индивидуумов, доживших до возраста a , или вероятность для одного человека дожить до этого воз-

раста, определяется функцией дожития, которая при отсутствии избыточного радиогенного риска имеет вид:

$$S(g, a) = e^{-\mu(g, a)}, \quad (2)$$

где $S(g, a)$ – функция дожития до возраста a с учетом пола человека g , g – пол, a – достигнутый возраст (лет), μ – общая смертность (на 1 человеко-год наблюдения).

Поскольку имеется фактор избыточного риска – профессиональное радиационное воздействие – в функции дожития показатель смертности имеет радиогенную составляющую и может быть представлен в виде аналогичного показателю смерти от рака легкого (формула (1)). В рамках проведенного исследования параметры модели общей смертности были получены в когорте работников ПО «Маяк» с использованием набора данных, для которого было проведено исследование [14].

В отличие от популяционной функции дожития, где интервал интегрирования начинается с первого года жизни человека, а сама функция принимает единичное значение при a , равном 0, в случае оценки избыточного риска смерти вследствие профессионального радиационного воздействия функция $S(g, a)$ должна быть равна единице в момент первого облучения.

На основе оценки избыточного относительного риска смерти от рака легкого (формула 1) в зависимости от накопленной в легком дозы альфа-излучения и функции дожития (формула (2)) в соответствии с формулой (3) определяется показатель пожизненной радиационной смерти от рака легкого (пожизненный риск) [16]:

$$\text{ПЖР} = \int_{a=0}^{90} [\mu(g, a, s, d_\alpha) - \mu_0(g, a, s)] \cdot S(g, a) d_\alpha, \quad (3)$$

где ПЖР – пожизненный риск смерти, μ – смертность от рака легкого (на 1 человеко-год наблюдения), μ_0 – смертность от рака легкого при отсутствии фактора профессионального облучения (на 1 человеко-год наблюдения), g – пол, a – достигнутый возраст (лет), s – статус курильщика, d_α – накопленная к возрасту a поглощенная в легком доза альфа-излучения с лагом 5 лет (Гр) для лиц, прошедших биофизическое обследование, S – функция дожития.

Согласно НРБ-99/2009 [1], при профессиональном контакте с источниками ИИ в условиях нормальной эксплуатации радиационных объектов величина показателя пожизненного риска не должна превышать приемлемого уровня, равного $1 \cdot 10^{-3}$ за один год поступления ^{239}Pu и 0,05 за весь период работы. Поскольку время выведения ^{239}Pu из организма превышает длительность жизни человека, то поступивший нуклид вносит вклад в радиогенный риск на протяжении всей жизни, поэтому интервал интегрирования не должен иметь верхнего предела, однако в проведенном исследовании использован предел 90 лет, аналогичный примененному в МКРЗ 103 [17]. В отечественной литературе [15, 18] был применен предел 100 лет.

Результаты

Входными для анализа риска данными являются наборы годовых эквивалентных (Зв) доз в легком после однократного поступления ^{239}Pu , на основе которых получены значения поглощенных доз в легком. Затем для каждого сценария облучения вычислены накопленные дозы за каждый день в течение последующих 70 лет. Значения доз с лагом 5 лет, накопленных к 90-летнему возрасту от поступления 1 Бк ^{239}Pu в день химических

соединений различных типов в течение одного, пяти, 10, 20, 30 и 50 лет за 70 лет представлены в таблицах 5, 7, 9. Относительное быстрое выведение соединений типа П приводит к тому, что накопленная за 70 лет доза за счет равномерного хронического поступления 1 Бк в день на порядок ниже, чем для двух других химических типов (М и МОКС). Увеличение накопленной дозы близко к прямо пропорциональному от длительности поступления на протяжении всего периода для соединений типа П: доза к 70-му году от 20-летнего возрастает в 19 раз, от 50-летнего – в 45 раз больше, чем от поступления в течение одного года. Наибольшие отклонения от линейной зависимости наблюдаются для МОКС-соединений, для которых дозы от 50-летнего и однолетнего поступления отличаются лишь в 35 раз.

Величины доз, накопленных к возрасту 90 лет при поступлении одного ПГП в год, представлены в таблицах 6, 8, 10. Для типа МОКС при однолетнем поступлении 440 Бк в 20-летнем возрасте через 70 лет к возрасту 90 лет накопленная в легком доза составит 0,016 Гр (0,32 Зв) и достигнет 10 Зв (0,58 Гр) при 50-летнем периоде ежегодного поступления. Доза от 50-летнего ингаляционного поступления соединений, отнесенных к типу М, в 1,1, а отнесенных к типу П, в 14 раз ниже. Более короткие периоды контакта с ^{239}Pu приводят к меньшим накопленным дозам. Так, при 20-летнем периоде поступления, начиная с возраста 20 лет, к 90-летнему возрасту в легком будут накоплены дозы, равные $17,5 \cdot 10^{-3}$, $232,4 \cdot 10^{-3}$, $293,7 \cdot 10^{-3}$ мГр для типов П, М и МОКС соответственно, в случае первого контакта с аэрозолями ^{239}Pu в возрасте 35 лет – $16,4 \cdot 10^{-3}$, $214,0 \cdot 10^{-3}$, $237,8 \cdot 10^{-3}$ мГр соответственно. Даже при 5-летнем периоде поступления медленно растворимых соединений нуклида в течение жизни человека накопленная доза может превысить 1 Зв.

При получении оценок избыточного абсолютного риска смерти от рака легкого на основе модели зависимости показателя смертности от радиационных и нерадиационных факторов (формула (1)) для каждого возраста были оценены показатели фоновой смертности μ_0 и избыточный относительный риск. Основными факторами, влияющими на величину фоновой смертности от рака легкого, учтенными в модели, являются пол, возраст и статус курильщика. В соответствии с использованными значениями параметров у мужчин курение увеличивает смертность от рака легкого в 4,7 (95 % ДИ: 3,7 – 6,0) раза [14]. Зависимость показателя от возраста для некурящих мужчин не отличается от общепринятой, когда наблюдается рост частоты ЗНО легкого до 70–80 лет и спад в более старших возрастах. Избыточный относительный радиационный риск зависит не только от накопленной дозы, но и достигнутого возраста. Так, в возрасте 60 лет коэффициент ИОР равен 7,4 на 1 Гр, в то время как в 35 лет он составляет 26,1, а к 80 годам – лишь 3,9. Избыточная абсолютная смертность от рака легкого значимо отличается для курящих и некурящих. Пик радиационно-индуцированной смертности достигается в возрасте 65 лет, составляя 6,3 случаев на 10^5 человек для некурящих и 4,2 случаев на 10^2 человек для курящих.

Оценки пожизненного радиационно-индуцированного риска смерти от рака легкого при накопленных в легком дозах от ^{239}Pu к возрасту 90 лет представлены в таблицах 5–10. Для соединений типа П (табл. 5, 6) ни при одном рассмотренном сценарии поступления оценка риска не превышает приемлемый уровень 5 %. Даже при поступлении на уровне ПГП, составляющем 800 Бк в год, в течение 50 лет, начиная с возраста 20 лет, оценка пожизненного риска составляет $3,3 \cdot 10^{-3}$

Таблица 5

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 Бк в день ^{239}Pu (тип соединения – П)
Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation intake of 1 Bq per day of ^{239}Pu (compound type – P)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
	35 лет	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	50 лет	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
10 лет	20 лет	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$
20 лет	20 лет	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
30 лет	20 лет	$11,7 \cdot 10^{-3}$	$11,6 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$11,0 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
50 лет	20 лет	$18,7 \cdot 10^{-3}$	$15,3 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$

Таблица 6

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 ПГП_{перс} в год ^{239}Pu (тип соединения – П)
Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation dose of 1 PGP_{per year} ^{239}Pu (compound type – P)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$
	35 лет	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$
	50 лет	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
10 лет	20 лет	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$8,3 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
20 лет	20 лет	$17,5 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$16,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
30 лет	20 лет	$25,7 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$24,0 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$
50 лет	20 лет	$40,9 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$

для некурящих и $1,1 \cdot 10^{-2}$ для курящих, т.е. в 15 и в 5 раз ниже приемлемого уровня (табл. 6). При таком сценарии в легком накоплена поглощенная доза ^{239}Pu , равная 41 мГр.

Аналогичный сценарий накопления соединений ^{239}Pu типа М приводит как к существенному увеличению накопленной в легком дозы (516 мГр при поступлении 650 Бк в год), так и к двукратному превышению уровня 5 % пожизненного риска для курящих ($9,8 \cdot 10^{-2}$) (табл. 10). Порог также превышен при других рассмотренных сценариях, когда поступление начинается в молодом возрасте. Так, при хроническом поступлении, начиная с 20 лет в течение последующих 30 лет, оценка риска для курящих составляет $8,6 \cdot 10^{-2}$, в течение 20 лет – $6,7 \cdot 10^{-2}$. Даже при 10-летнем периоде поступления оценка пожизненного радиогенного риска (3,8 %), хоть и не достигает, но приближается к пределу.

Близкие результаты были получены для соединений, отнесенных к типу МОКС (табл. 7, 8). Рекомендованный ПГП для МОКС-соединений составляет 440 Бк в год, что близко (в 1,2 раза выше) к референсному уровню в 1 Бк в день. Обе величины поступления (ПГП и 1 Бк в день) приводят к превышению предела приемлемого риска при поступлении в течение 20, 30 или 50 лет, при

Таблица 7

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 Бк в год ^{239}Pu (тип соединения – МОКС)

Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation dose of 1 Bq/year of ^{239}Pu (compound type – MOX)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$13,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$11,4 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
10 лет	20 лет	$128,7 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$107,2 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$
	50 лет	$80,4 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
20 лет	20 лет	$243,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$197,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
30 лет	20 лет	$342,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$7,1 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$267,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
50 лет	20 лет	$481,6 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$

Таблица 8

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 ПГП_{перс} в год ^{239}Pu (тип соединения – МОКС)

Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation intake of 1 PGPP_{per year} ^{239}Pu (compound type – MOX)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$16,2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$13,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$10,8 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
10 лет	20 лет	$155,2 \cdot 10^{-3}$	$11,9 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$129,3 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
	50 лет	$96,2 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
20 лет	20 лет	$293,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$237,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$
30 лет	20 лет	$412,8 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,4 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$322,3 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
50 лет	20 лет	$580,6 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$

условии начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu в 20-летнем возрасте курящих мужчин.

Для соединений всех типов оценка радиогенного риска смерти от рака легкого некурящих мужчин ниже 5 %.

Обсуждение

До настоящего времени на международном уровне в качестве центральной величины при оптимизации защиты и установлении критериев контроля, а именно пределов, ограничений и контрольных уровней, применяется величина эффективной дозы [19]. Однако существующие многочисленные недостатки и ограничения ее использования приводят к необходимости поиска других подходов. Стоит также отметить, что для обоснования предела эффективной дозы МКРЗ использует модели показателей заболеваемости и смертности от ЗНО, полученные на основе данных когорты LSS. Формирование дозы при поступлении ^{239}Pu и наблюдаемые при этом медицинские последствия отличаются, а следовательно, требуют применения иных моделей. На основании результатов эпидемиологических исследований медицинских последствий радиационного воздействия получены модели и оценки параметров, позволяющие

Таблица 9

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 Бк в год ^{239}Pu (тип соединения – М)

Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation dose of 1 Bq/year of ^{239}Pu (compound type – M)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
10 лет	20 лет	$66,4 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$62,4 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$54,4 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
20 лет	20 лет	$130,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$120,1 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
30 лет	20 лет	$190,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$170,3 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$
50 лет	20 лет	$289,9 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$

Таблица 10

Пожизненный радиогенный риск смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении 1 ПГП_{перс} в год ^{239}Pu (тип соединения – М)

Lifetime radiogenic risk of death from lung cancer at an inhalation intake of 1 PGPPers per year ^{239}Pu (compound type – M)

Длительность контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Возраст на момент начала контакта с аэрозолями ^{239}Pu	Накопленная к возрасту 90 лет с лагом 5 лет поглощенная в легком доза, Гр	Статус курения: не курит	Статус курения: курит
1 год	20 лет	$12,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
	35 лет	$11,4 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
	50 лет	$10,2 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
10 лет	20 лет	$118,3 \cdot 10^{-3}$	$11,1 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$111,2 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$
	50 лет	$96,8 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
20 лет	20 лет	$232,4 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$6,7 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$214,0 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$4,6 \cdot 10^{-2}$
30 лет	20 лет	$339,8 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-2}$
	35 лет	$303,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$
50 лет	20 лет	$516,2 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$9,8 \cdot 10^{-2}$

прогнозировать величины показателей заболеваемости и смертности от отдельных причин, в том числе ЗНО, которые являются основой для оценки пожизненного риска, который, в свою очередь, может сам быть базой для принятия управленческих решений с использованием риск-ориентированного подхода.

Результаты эпидемиологических исследований радиационного риска ЗНО у персонала ПО «Маяк» и Селлафилда [10] свидетельствуют, что ингаляционное поступление различных химических соединений ^{239}Pu являлось важным фактором радиационного риска, в первую очередь, рака легкого. В результате на ядерно-опасных предприятиях программы радиационного контроля включают индивидуальный контроль содержания ^{239}Pu в организме работников. Установленные и контролируемые при этом пределы годового поступления нуклида должны обеспечивать непревышение значения приемлемого радиогенного пожизненного риска, равного 5 % для персонала. Однако представленные результаты указывают на возможность достижения и даже двухкратного превышения установленного предела.

Использованные при расчетах доз биокинетические и дозиметрические модели, а также значения ПГП для

соединений типа П и М отличаются от принятых в НРБ-99/2009 [1]. Тем не менее, выводы о возможности превышения предела по показателю пожизненного риска для малорастворимых соединений повторяют предыдущие результаты, полученные с использованием данных о работниках ПО «Маяк» и принятых в РФ уровней ППП [15]. Более того, показано, что на участках по производству МОКС-топлива предлагаемое в качестве предела значение величины годового поступления, равное 440 Бк, также приводит к превышению предела пожизненного риска ЗНО.

Помимо величины накопленной дозы, на полученный результат оказывает значительное влияние применение модели избыточного относительного риска, в которой риск смерти от рака легкого в зависимости от курения и уровня альфа-облучения описывается мультипликативной функцией, которая, как было показано в работе [15], лучше, чем аддитивная зависимость, описывает данные для персонала ПО «Маяк».

Заключение

- 1 Показана возможность двукратного превышения предела по показателю пожизненного риска смерти от рака легкого при ингаляционном поступлении химических соединений ^{239}Pu типа М и МОКС на уровне ППП.
- 2 Наибольшие оценки риска получены при начале работы в контакте с аэрозолями ^{239}Pu в молодом возрасте (20 лет).
- 3 Помимо величины дозы, важным фактором избыточной смертности является фактор курения, который увеличивает не только фоновую смертность, но и избыточную абсолютную смертность при использовании мультипликативной модели для описания показателя смертности от рака легкого в зависимости от курения и накопленной дозы внутреннего альфа-облучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ/ REFERENCES

1. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09 № 47 от 7 июля 2009 г. Электронный ресурс. (Дата обращения 17.03.2025) [*Normy Radiatsionnoy Bezopasnosti NRB-99/2009* = Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations. SanPiN 2.6.1.2523-09 dated July 7, 2009 No. 47 (In Russ.) (Date of Access 17.03.2025)]. URL: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/>
2. Paquet F., Etherington G., Bailey M.R., Leggett R.W., Lipsztein J., Bolch W., Eckerman K.F., Harrison J.D. ICRP. ICRP Publication 130: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. Ann ICRP. 2015; 44:2:5–188. doi: 10.1177/0146645315577539.
3. Paquet F., Bailey M.R., Leggett R.W., Lipsztein J., Fell T.P., Smith T., Nosske D., Eckerman K.F., Berkovski V., Ansoborlo E., Giussani A., Bolch W.E., Harrison J.D. ICRP Publication 134: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. Ann ICRP. 2016;45:3:4:7–349. doi: 10.1177/0146645316670045. PMID: 28657340.
4. Paquet F., Bailey M.R., Leggett R.W., Lipsztein J., Marsh J., Fell T.P., Smith T., Nosske D., Eckerman K.F., Berkovski V., Blanchardon E., Gregoratto D., Harrison J.D. ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. Ann ICRP. 2017;46:3:4:1–486. doi: 10.1177/0146645317734963.
5. Paquet F., Bailey M.R., Leggett R.W., Etherington G., Blanchardon E., Smith T., Ratic G., Melo D., Fell T.P., Berkovski V., Harrison J.D. ICRP Publication 141: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 4. Ann ICRP. 2019;48:2:3:9 – 501. doi: 10.1177/0146645319834139.
6. ICRP. Guide for the Practical Application of the ICRP Human Respiratory Tract Model. ICRP Supporting Guidance 3. Ann. ICRP. 2002;32:1-2. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Supporting%20Guidance%203> (Date of Access 18.03.2025)
7. ICRP. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Supplement to Part 1). Ann. ICRP. 1979;3:1-4. URL: [https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2030%20\(Supplement%20to%20Part%201\)](https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2030%20(Supplement%20to%20Part%201)) (Date of Access 18.03.2025).
8. ICRP. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100. Ann. ICRP. 2006;36:1-2. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20100> (Date of Access 18.03.2025).
9. Сокольников М.Э., Кабилова Н.Р., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А., Царева Ю.В., Мартиненко И.А., Денисова Е.В. Медико-дозиметрический регистр персонала производственного объединения «Маяк»: состояние и перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 2023. Т.3. №11. С. 42–55 [Sokol'nikov M.E., Kabirova N.R., Okatenko P.V., Koshurnikova N.A., Tsareva YU.V., Martinenko I.A., Denisova Ye.V. Medical and Dosimetric Register of Personnel of the Mayak Production Association: Status and Prospects. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2023;3;111:42–55 (In Russ)].
10. Tirmarche M., Apostoaei I., Blanchardon E., Ellis E.D., Gilbert E., Harrison J.D., Laurier D., Marsh J.W., Sokolnikov M., Wakeford R., Zhivin S. ICRP Publication 150: Cancer Risks from Plutonium and Uranium Exposure. Ann ICRP. 2021;50:4:1–143. doi: 10.1177/01466453211028020.
11. 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;26;10:2:e0117784. doi: 10.1371/journal.pone.0117784. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4342229/> (Date of Access 18.03.2025).
12. Kuznetsova I.S., Labutina E.V., Hunter N. Radiation Risks of Leukemia, Lymphoma and Multiple Myeloma Incidence in the Mayak Cohort: 1948-2004. PLoS One. 2016;11:9:e0162710. doi: 10.1371/journal.pone.0162710. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0162710> (Date of Access 18.03.2025).
13. Sokolnikov M.E., Gilbert E.S., Preston D.L., Ron E., Shilnikova N.S., Khokhryakov V.V., Vasilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung, liver and Bone Cancer Mortality in Mayak Workers. Int J Cancer. 2008;15;123:4:905–911. doi: 10.1002/ijc.23581.
14. Gilbert E.S., Sokolnikov M.E., Preston D.L., Schonfeld S.J., Schadilov A.E., Vasilenko E.K., Koshurnikova N.A. Lung Cancer Risks from Plutonium: an Updated Analysis of Data from the Mayak Worker Cohort. Radiat. Res. 2013;179;3:332–342.
15. Сокольников М.Э., Востротин В.В., Ефимов А.В., Василенко Е.К., Романов С.А. Пожизненный риск смерти от рака лёгкого при различных сценариях ингаляционного поступления ^{239}Pu // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). 2015. Т. 24. № 3. С. 59–69 [Sokol'nikov M.E., Vostrotin V.V., Yefimov A.V., Vasilenko Ye.K., Romanov S.A. Lifetime Risk of Death from Lung Cancer Under Different Scenarios of Inhalation Intake of ^{239}Pu . *Radiatsiya i Risk (Byulleten' NRER)* = Radiation and Risk. 2015;24;3:59-69 (In Russ.)].
16. 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;3:259–72.
17. Труды МКРЗ. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной Комиссии по Радиационной защите / Под ред. М.Ф. Киселева и Н.К. Шандалы. М., 2009. 344 с. [*Trudy MKRZ. Publikatsiya 103 MKRZ. Rekomendatsii 2007 Goda Mezhdunarodnoy Komissii po Radiatsionnoy Zashchite* = Proceedings of the ICRP. Publication 103 ICRP. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiation

- Protection. Ed. M.F. Kiselev, N.K. Shandala. Moscow Publ., 2009. 344 p. (In Russ.)]
18. Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Кащеев В.В., Максютков М.А., Корело А.М., Туманов К. А., Пряхин Е.А., Ловачев С.С., Карпенко С.В., Кащеева П.В., Иванов В.К. Пожизненный радиационный риск в результате внешнего и внутреннего облучения: метод оценки // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). 2018. Т. 27. №1. С. 8-21 [Mennyaylo A.N., Chekin S.YU., Kashcheyev V.V., Maksyutov M.A., Korelo A.M., Tumanov K.A., Pryakhin Ye.A., Lovachev S.S., Karpenko S.V., Kashcheyeva P.V., Ivanov V.K. Lifetime Radiation Risk Due to External and Internal Irradiation: Assessment Method. *Radiatsiya i Risk (Byulleten' NRER)* = Radiation and Risk. 2018;27;1:8-21 (In Russ.)].
19. Harrison J.D., Balonov M., Martin C.J., Ortiz Lopez P., Menzel H.G., Simmonds J.R., Smith-Bindman R., Wakeford R. Use of Effective Dose. *Annals of the ICRP*. 2016;45;1: 215–224. doi:10.1177/0146645316634566.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Государственное задание на выполнение прикладной научно-исследовательской работы по теме «Обеспечение индивидуального дозиметрического контроля персонала «Горно-химического комбината (шифр «ИДК ГХК 25»; Код-11.001.25.800).

Участие авторов. И.С. Кузнецова – расчёты, написание текста статьи, М.Э. Сокольников – разработка дизайна исследования, А.В. Ефимов – разработка концепции исследования, А.Б. Соколова – оценка доз, научное редактирование текста.

Поступила: 20.07.2025. Принята к публикации: 25.08.2025.

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

Financing. State assignment for carrying out applied research work on the topic "Ensuring Individual Dosimetric Control of Personnel at the Mining and Chemical Plant" (code "IDK MCP 25"; code-11.001.25.800).

Contribution. I.S. Kuznetsova – calculations and article writing, M.E. Sokolnikov – research design, A.V. Efimov – research concept, A.B. Sokolova – dose assessment and scientific editing.

Article received: 20.07.2025. Accepted for publication: 25.08.2025.