

М.Э. Сокольников, В.В. Востротин, А.В. Ефимов, Е.К. Василенко, С.А. Романов  
**ПОЖИЗНЕННЫЙ РИСК СМЕРТИ ОТ РАКА ЛЕГКОГО  
ПРИ ИНГАЛЯЦИИ ПЛУТОНИЯ-239**

Южно-Уральский институт биофизики, Челябинская область, Озерск. E-mail: sokolnikov@subi.ru

М.Э. Сокольников – зав. лаб., д.м.н.; В.В. Востротин – зав. лаб., к.б.н.; А.В. Ефимов – и.о. зав.отделом радиационной безопасности и дозиметрии; Е.К. Василенко – начальник Южно-Уральского регионального медико-дозиметрического центра; С.А. Романов – директор Южно-Уральского института биофизики, к.б.н.

**Реферат**

**Цель:** Оценка надежности норм радиационной безопасности при ингаляционном поступлении плутония-239.

**Материал и методы:** На основании данных, полученных при оценке канцерогенного риска в когорте работников ПО «Маяк», с использованием статистических данных о смертности в России от всех причин и от рака легкого проведен расчет показателя пожизненного избыточного риска.

**Результаты:** Действующие в настоящее время нормы радиационной безопасности устанавливают предел годового поступления соединений плутония-239 класса М на уровне 1300 Бк в год. Пределы годового поступления рассчитываются таким образом, что величина ожидаемой эффективной дозы, накапливаемой за 50 лет после поступления, должна составлять 20 мЗв. Вместе с тем, нормы радиационной безопасности ограничивают величину пожизненного избыточного риска смерти от злокачественных новообразований на уровне 0,05 (для персонала группы А), или годовое приращение данной величины на уровне 0,001. Эквивалентная доза альфа-облучения легких плутонием-239 при ингаляционном поступлении низкотранспортабельных соединений нуклида на уровне ППП в течение 50 лет составляет (при расчете доз с использованием модели ДОЗЫ-2008) 7 Зв. Учитывая динамику накопления дозы альфа-облучения легкого при таком сценарии поступления низкотранспортабельных соединений нуклида, были рассчитаны показатели избыточного относительного риска, пожизненного избыточного риска и его годового инкремента. При этом, показатель пожизненного избыточного риска смерти от рака легкого, накопленного за 50 лет облучения, составляет 0,08, т.е. заведомо превышает ограничение, предусматриваемое нормами радиационной безопасности. Показатель годового инкремента пожизненного избыточного риска превышает установленный нормами радиационной безопасности предел 0,001 в возрасте 45 лет и старше. Данные результаты свидетельствуют о недостаточной степени защиты персонала, работающего с низкотранспортабельными соединениями плутония-239, ограничениями поступления нуклида в нынешней редакции норм радиационной безопасности. По-видимому, это связано с тем, что вклад легкого в ущерб, наносимый действием ионизирующей радиации организму, усредняется для лиц всех возрастов, в то время как с плутонием работают лица трудоспособного возраста, для которых вклад легкого в ущерб примерно в два раза выше.

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, пожизненный риск, ингаляционное поступление, плутоний-239

Поступила: 26.09.2014. Принята к публикации: 29.12.2016

**Введение**

В действующих нормах радиационной безопасности [1] указывается, что в условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются исходя из значения индивидуального пожизненного избыточного риска, равного для персонала  $1,0 \times 10^{-3}$  в год, что составляет  $5 \times 10^{-2}$  за 50 лет профессиональной карьеры. Это означает, что все остальные нормируемые величины, включая основной предел дозы (20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет), а также пределы годового поступления нуклидов являются производными от принятого значения максимально допустимого пожизненного избыточного риска.

Пожизненный избыточный риск, обусловленный действием ионизирующей радиации, является, таким образом, единственным (в соответствии с НРБ) критерием обоснованности этих норм. Если при радиационном воздействии в пределах, установленных для нормируемых величин, показатель пожизненного избыточного риска окажется превышенным, это означает неадекватность установленного дозового предела. В частности, если при ингаляционном поступлении  $^{239}\text{Pu}$  в организм на уровне предела годового поступления (ППП), пожизненный избыточный будет риск превышать значение  $5 \times 10^{-2}$  за 50 лет или  $1,0 \times 10^{-3}$  за год, то требуемый НРБ уровень радиационной защиты персонала не будет обеспечен.

Научной основой современных норм радиационной безопасности являются результаты, полученные при эпидемиологическом исследовании когорты лиц, переживших атомную бомбардировку в Японии [2–4]. Именно полученные в данных исследованиях оценки

риска Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) использовала при разработке рекомендаций [5, 6], на которых основаны действующие в России Нормы Радиационной Безопасности [1].

Однако необходимо отметить, что использованные МКРЗ коэффициенты радиогенного риска получены для однократного радиационного воздействия внешнего излучения, при котором происходит практически равномерное облучение всего тела. При ингаляционном поступлении  $^{239}\text{Pu}$  действию альфа-излучения подвергаются в первую очередь органы основного депонирования нуклида: легкие, печень и скелет. При этом даже однократное поступление  $^{239}\text{Pu}$  приводит к тому, что действие излучателя начинается с момента поступления и далее продолжается на протяжении всей оставшейся жизни индивида. Ранее в работе [7] был проведен анализ смертности от рака легкого в когорте работников ПО «Маяк» и установлен характер зависимости смертности от поглощенной дозы внешнего гамма-излучения и альфа-излучения инкорпорированного плутония, а также от возраста, пола и курения табака для этой когорты.

В представляемой работе на основании результатов, полученных в [7], проведен анализ показателей пожизненного избыточного риска при различных сценариях ингаляционного поступления соединений  $^{239}\text{Pu}$  с различной транспортабельностью.

**Материал и методы**

Для оценки пожизненного избыточного риска использовали показатель ELR (Excess Lifetime Risk, пожизненный избыточный риск), поскольку именно этот показатель был использован в нормах радиационной

безопасности [1]. Данный показатель, в соответствии с [8], определяется уравнением:

$$ELR_c(e, D) = \int_e^{\infty} \mu_c(a|e, D)S(a|e, D)da - \int_e^{\infty} \mu_c(a)S(a|e)da \quad (1)$$

где  $\mu_c(a)$  – показатель смертности от причины  $c$  в возрасте  $a$ ;  $\mu_c(a|e, D)$  – показатель смертности от причины  $c$  в возрасте  $a$  при накоплении к возрасту  $e$  дозы облучения  $D$ ;  $S(a|e, D)$  – вероятность дожития до возраста  $a$  при накоплении к возрасту  $e$  дозы  $D$ ,  $S(a|e)$  – условная вероятность дожития до возраста  $a$  при условии дожития до возраста  $e$  и отсутствия облучения. Для определения значений функции  $S(a|e)$  мы использовали данные таблицы продолжительности жизни населения России в 1990 г. [9], доступные в Интернете по состоянию на 18 ноября 2011 года по адресу [www.mortality.org](http://www.mortality.org) или [www.humanmortality.de](http://www.humanmortality.de).

В качестве значений функции  $\mu_c(a)$  были использованы повозрастные показатели смертности от рака легкого в России в 1990 г. [10].

Для описания смертности от рака легкого использовали модель, полученную в [7] при анализе данных когорты персонала ПО «Маяк». Эта модель описывает показатели смертности от рака легкого в зависимости от дозы радиационного воздействия, возраста, пола, курения и представляет собой модель избыточного относительного риска. В общем виде данная модель записывается в виде:

$$\mu(a, D_\alpha, D_\gamma, s, \eta) = \mu_0(a, s, \eta) \times (1 + ERR(a, D_\alpha, D_\gamma, s)) \quad (2)$$

где:

$\mu$  – смертность от рака легкого, случаев на 100000 человеко-лет наблюдения;

$\mu_0$  – фоновая (обусловленная нерадиационными факторами) смертность от рака легкого;

$ERR$  – избыточный относительный риск;  $a$  – возраст, лет,  $D_\alpha, D_\gamma$  – дозы альфа- и гамма-излучения соответственно,  $s$  – пол,  $\eta$  – дискретная переменная, указывающая, являлся ли человек курильщиком когда-либо в жизни (да, нет, неизвестно).

С учетом полученных в работе [7] параметров (табл. 1), зависимость  $ERR(a, D_\alpha, D_\gamma, s)$  для мужчин записывается в виде:

$$ERR(a, D_\alpha, D_\gamma, s) = 7,4 \times D_\alpha \times e^{-3,1 \times \ln(\frac{a}{60})} + 0,13 \times D_\gamma \quad (1)$$

где:

7,4 – коэффициент  $ERR$  на единицу дозы альфа-излучения  $^{239}\text{Pu}$ ;

$D_\alpha$  – накопленная доза  $\alpha$ -излучения  $^{239}\text{Pu}$ , Гр;

–3,1 – коэффициент уменьшения риска с возрастом;

$a$  – достигнутый возраст, лет;

0,13 – коэффициент  $ERR$  на единицу дозы внешнего  $\gamma$ -излучения;

$D_\gamma$  – накопленная доза внешнего  $\gamma$ -излучения  $^{239}\text{Pu}$ , Гр.

Поскольку расчеты проведены только для мужчин, коэффициент  $s$  принимали равным нулю.

При расчете избыточного относительного риска учитывали минимальный лаг-период, равный 5 годам. Это означает, что при начале облучения легкого плутонием в 20 лет, увеличение риска, связанное с дозой, накопленной в возрасте 20 лет, наступает не ранее, чем через 5 лет (в возрасте 25 лет) и так далее, для всех

возрастов. Использование лаг-периода обусловлено тем, что для развития опухоли необходимо некоторое (неизвестное) время, при этом доза, полученная непосредственно в год смерти (или за 1–5 лет до неё) уже не вносит вклада в увеличение риска. Использование пятилетнего лаг-периода позволяет исключить (с некоторой долей неопределенности) то минимальное время, когда увеличение дозы, в соответствии с современными представлениями о патогенезе злокачественных новообразований, уже не может вносить вклада в увеличение радиогенного риска и тем самым позволяет избежать занижения риска. Приведенное значение лаг-периода соответствовало использованному в [7].

Для оценки пожизненного избыточного риска при ингаляционном поступлении соединений плутония особую важность имеет динамика накопления дозы альфа-излучения в легком. В зависимости от типа соединения (высоко- или низкотранспортабельные соединения), кратности поступления (однократное или хроническое) характер накопления дозы радиационного воздействия может существенно изменяться. Для целей данной работы мы принимали за высокотранспортабельные соединения те, которые относятся в НРБ-99/2000 к классу П, а за низкотранспортабельные – относящиеся к классу М. Дозы, обусловленные ингаляционным поступлением  $^{239}\text{Pu}$ , были оценены по модели «Дозы-2008» [11] для:

- 1) однократного ингаляционного поступления плутония на уровне ППП, указанного в [1] и составляющего для низкотранспортабельных соединений плутония 1300 Бк в год, а для высокотранспортабельных – 78 Бк в год;
- 2) хроническое, в течение 50 лет профессиональной карьеры, ингаляционное поступление плутония на уровне ППП.

Для всех сценариев расчеты проведены для возраста работника 20 лет на момент начала поступления  $^{239}\text{Pu}$ .

## Результаты

Динамика накопления дозы альфа-излучения плутония в легком при однократном и хроническом поступлении плутония с различной транспортабельностью на уровне ППП за 50 лет после начала поступления представлена на рис. 1 и в табл. 2. При поступлении высокотранспортабельных соединений  $^{239}\text{Pu}$  к 50-му году облучения в легком формируются дозы, составляющие от  $2,2 \times 10^{-3}$  (однократное поступление) до  $6,3 \times 10^{-2}$  Зв (хроническое поступление). Поскольку низкотранспортабельные соединения плутония выводятся из легких гораздо медленнее, в легком накапливаются гораздо более высокие дозы альфа-излучения плутония, составляющие от  $6,9 \times 10^{-2}$  до 7 Зв (табл. 2).

Зная динамику накопления дозы альфа-излучения  $^{239}\text{Pu}$  в легком за каждый год работы в контакте с соединениями этого нуклида и зависимость показателя риска от дозы и достигнутого возраста, мы определили показатель избыточного относительного риска за каждый год воздействия альфа-излучения. При этом, так как в данной работе мы рассматриваем только риск, связанный с действием альфа-излучения инкорпори-

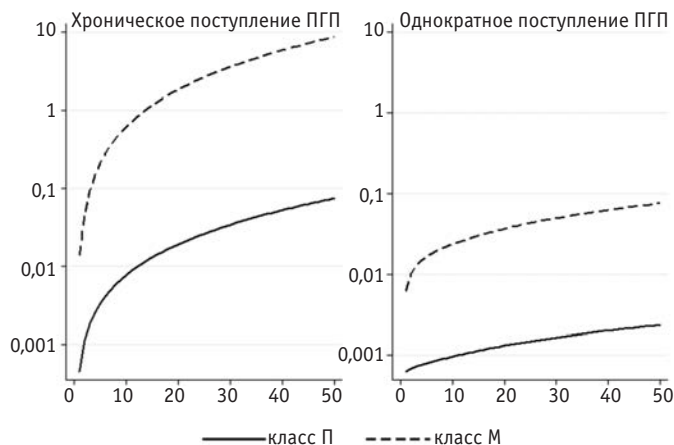


Рис. 1. Динамика накопления дозы альфа-излучения <sup>239</sup>Pu в легком за 50 лет с момента начала ингаляционного поступления нуклида при хроническом и однократном поступлении высоко- (класс II) и низкотранспортабельных (класс M) соединений на уровне ПГП. По оси абсцисс – время после начала поступления, годы. По оси ординат – эквивалентная доза альфа-излучения в легком, Зв

рованного <sup>239</sup>Pu, мы приняли уровень действия внешнего гамма-излучения за нулевой. Для каждого из типов соединений и сценариев поступления плутония величина ERR указывает, на сколько процентов увеличивается показатель смертности от рака легкого лиц соответствующего возраста, по сравнению с «фоновым». Зная повозрастные показатели смертности, количество лиц, доживших до соответствующего возраста S(a|e) и показатель избыточного относительного риска, для каждого из сценариев облучения было вычислено число смертей от рака легкого в гипотетической популя-

Таблица 1

Параметры модели (уравнение 2), использованные для расчета показателей смертности от рака легкого в зависимости от дозы альфа-излучения и возраста

Параметр	Значение	95 % ДИ
ERR/Gy для альфа-излучения <sup>239</sup> Pu в возрасте 60 лет	7,4	5,0, 11
Изменение ERR/Gy с возрастом, e <sup>x</sup>	-3,1	-(5,4, 0,8)
ERR/Gy для внешнего гамма-излучения	0,13	(-0,04, 0,38)

ции таблицы продолжительности жизни, а также вероятность смерти от рака легкого при том или ином сценарии облучения. Разница между «фоновой» вероятностью смерти от рака легкого (т.е. при отсутствии радиационного воздействия) и вероятностью смерти от рака легкого при том или ином сценарии облучения представляет собой искомый показатель пожизненно-радиационно-индуцированного избыточного риска. Превышение этим показателем величины 0,001 (0,1 %) в год или величины 0,05 (5 %) к 50-ти годам после начала воздействия плутония будет свидетельствовать о превышении разрешенного нормами радиационной безопасности предела пожизненного риска.

Зависимость показателей избыточного пожизненного риска от возраста при соответствующей накопленной дозе представлена на рис. 2 и рис. 3 для соединений класса II и M соответственно. Для высокотранспортабельных соединений при поступлении на уровне ПГП показатель пожизненного избыточного риска, сформированного за год или накопленного за 50 лет после начала поступления, не превышает

Таблица 2

Эквивалентная доза облучения легкого (Зв) и пожизненный избыточный риск к возрасту 70 лет при однократном и хроническом поступлении соединений <sup>239</sup>Pu на уровне ПГП и возрасте начала контакта 20 лет

Сценарий облучения	Высокотранспортабельные соединения (класс II)	Низкотранспортабельные соединения (класс M)
Эквивалентная доза облучения легкого, Зв		
Однократное поступление на уровне ПГП	2,2×10 <sup>-3</sup>	6,9×10 <sup>-2</sup>
Хроническое поступление на уровне ПГП	6,3×10 <sup>-2</sup>	7,1×10 <sup>0</sup>
Пожизненный избыточный риск		
Однократное поступление на уровне ПГП	3,6×10 <sup>-5</sup>	1,1×10 <sup>-3</sup>
Хроническое поступление на уровне ПГП	0,8×10 <sup>-3</sup>	84×10 <sup>-3</sup>

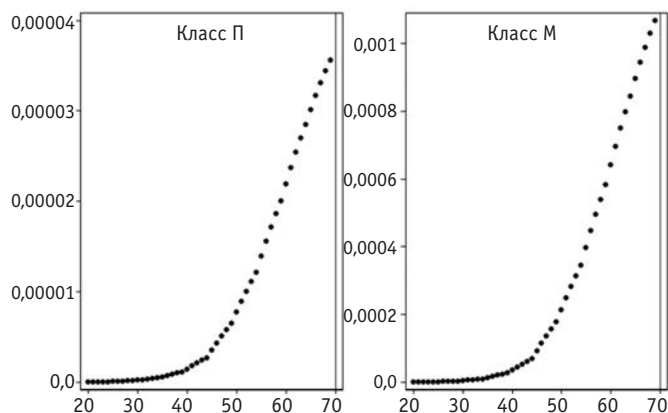


Рис. 2. Пожизненный избыточный риск рака легкого при однократном поступлении в возрасте 20 лет высоко- (класс II) и низкотранспортабельных (класс M) соединений плутония на уровне ПГП. По оси абсцисс – возраст, годы, по оси ординат – накопленный от момента начала облучения пожизненный избыточный риск. Вертикальная черта обозначает возраст 70 лет

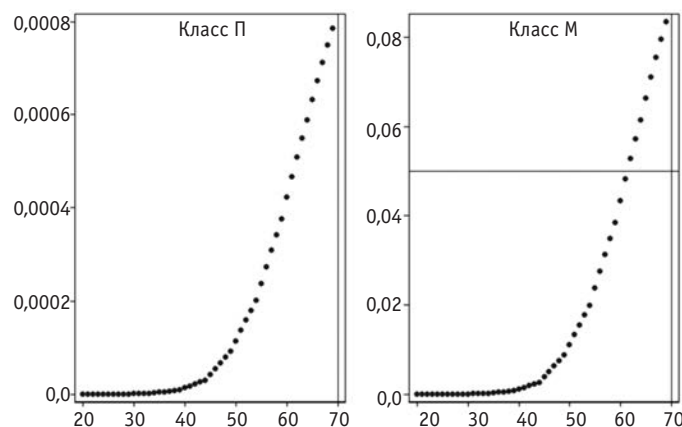


Рис. 3. Пожизненный избыточный риск рака легкого при хроническом поступлении, начиная с возраста 20 лет, высоко- (класс II) и низкотранспортабельных (класс M) соединений плутония на уровне ПГП. По оси абсцисс – возраст, годы. По оси ординат – пожизненный избыточный риск. Вертикальная черта обозначает возраст 70 лет, горизонтальная черта – уровень приемлемого риска в 0,05

в любой период после начала радиационного воздействия (рис. 2, табл. 2).

ПГП плутония-239 в виде низкотранспортабельных соединений (оксид плутония) составляет 1300 Бк в год. При таком поступлении плутония в течение 50 лет доза облучения легкого составит 7,1 Зв (табл. 2). Пожизненный избыточный риск при поступлении на уровне ПГП в течение всей профессиональной карьеры (50 лет) составит 0,084 – только за счет увеличения смертности от рака легкого, без учета возможного вклада со стороны других органов – что в 1,7 раз превышает регламентированный НРБ предел (табл. 2). Следует отметить, что значение пожизненного избыточного риска (0,05) при таком сценарии облучения превышает в возрасте 62 лет (рис. 3). Кроме того, показатель пожизненного избыточного риска в год при таком сценарии поступления превышает установленную НРБ величину 0,001, начиная с 26-го года после начала облучения плутонием, т.е. с возраста 45 лет.

### Обсуждение

Результаты оценки показателей пожизненного избыточного риска свидетельствуют о том, что существующие нормы радиационной безопасности не обеспечивают адекватной защиты персонала, работающего с плутонием, по крайней мере, при его поступлении в виде низкотранспортабельных соединений. Действительно, при ингаляционном поступлении плутония в данной химической форме на уровне ПГП, пожизненный избыточный риск смерти от рака легкого превышает установленные нормами радиационной безопасности значение в 1,7 раза, при этом регламентируемая величина риска за 50 лет превышена в возрасте 62 года, а величина риска в год – даже с возраста 45 лет.

Причина этого, по нашему мнению, состоит в том, что ПГП плутония в форме низкотранспортабельных соединений рассчитан исходя из того, что эффективная доза за счет радиационного воздействия от всех источников облучения тела, в соответствии с нормами радиационной безопасности, не должна превышать 20 мЗв в год. При ингаляционном поступлении низкотранспортабельных соединений плутония, которые медленно выводятся из легких, облучаются, в основном, именно легкие. При этом вклад легких в эффективную дозу рассчитывается, исходя из значения дозы альфа-излучения, поглощенной в легком, относительной биологической эффективности альфа-излучения и взвешивающего тканевого множителя, составляющего для легкого 0,12. Величины взвешивающих тканевых множителей рассчитаны на основе коэффициентов ущерба от злокачественных новообразований различных локализаций и приведены в публикации 103 МКРЗ [5]. Однако данные коэффициенты рассчитаны на основании сведений о заболеваемости/смертности от злокачественных новообразований лиц всех возрастов и лиц обоего пола. В то же время известно, что смертность и заболеваемость злокачественными новообразованиями существенно зависит от возраста. При этом рак легкого практически не встречается у лиц моложе 15 лет, а затем (в особенности после 40 лет) смертность

от рака легкого удваивается каждые 5 лет. Кроме того, у женщин рак легкого встречается в 5–10 раз реже, чем у мужчин (во всяком случае – в России, где женщины курят гораздо меньше, чем мужчины). Усреднение коэффициентов ущерба для лиц обоего пола и всех возрастов приводит к их существенному занижению по сравнению с ущербом, наносимым радиационно-индуцированной смертностью от рака легкого в группе лиц, работающих с плутонием, которая представлена в основном мужчинами. В определенной степени это отражено в публикации 103 МКРЗ [5], где коэффициенты ущерба, рассчитанные для лиц трудоспособного возраста (20–70 лет), в 2 раза превышают коэффициенты для лиц всех возрастов.

Исходя из изложенного, для обеспечения надежной защиты персонала, работающего с плутонием, можно предложить несколько путей. Во-первых, поскольку система радиационной защиты и нормирования радиационного воздействия в настоящее время основана на применении величины эффективной дозы, при организации радиационной защиты персонала возможно применение наборов взвешивающих тканевых множителей, рассчитанных отдельно для лиц трудоспособного возраста каждого пола. При таком подходе вклад легких в величину эффективной дозы увеличится, а величина ПГП должна быть соответственно уменьшена. Это позволит остаться в рамках существующей системы радиационной защиты и корректно учитывать радиационное воздействие при ингаляционном поступлении плутония. Во-вторых, поскольку группа лиц, работающих с плутонием, по сравнению с численностью лиц, подвергающихся профессиональному радиационному воздействию, относительно невелика, возможно введение специального регламента нормирования радиационного воздействия для данной группы лиц. При таком подходе потребуются разработка соответствующего регламента.

### Выводы

1. При ингаляционном поступлении низкотранспортабельных соединений плутония-239 на уровне предела годового поступления радионуклида, установленного действующими нормами радиационной безопасности, требования НРБ о непревышении уровня пожизненного избыточного риска в 0,05 за 50 лет и 0,001 в год не могут быть выполнены.

2. Показатель суммарного пожизненного риска оказывается превышенным в возрасте 62 года, а показатель пожизненного риска в год – в возрасте 45 лет.

3. Применение к лицам, относящимся к категории «персонал», взвешивающих тканевых коэффициентов, усредненных для лиц всех возрастов и обоих полов, существенно занижает оценку ущерба от рака легкого у лиц трудоспособного возраста.

4. В своем нынешнем виде действующие нормы радиационной безопасности не позволяют обеспечить радиационную защиту персонала, работающего в условиях возможного ингаляционного поступления плутония.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Pierce D.A., Shimizu Y., Preston D.L. et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12. Part I. Cancer: 1950–1990. 1996 // Radiat. Res. 2012. Vol. 178. № 2. P. 61–87.
3. Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A. et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997. 2003 // Radiat. Res. 2012. Vol. 178. № 2. P. 146–172.
4. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S. et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998 // Radiat. Res. 2007. Vol. 168. № 1. P. 1–64.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Ann. ICRP. 2007. Vol. 37. № 2–4. P. 1–332.
6. ICRP 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 60 // Ann. ICRP. 1991. Vol. 21. № 1–3.
7. Gilbert E.S., Sokolnikov M.E., Preston D.L. et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort // Radiat. Res. 2013. Vol. 179. № 3. P. 332–342.
8. Thomas D., Darby S., Fagnani F. et al. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods // Health Phys. 1992. Vol. 63. № 3. P. 259–272.
9. Human Mortality Database. University of California, Berkley (USA), Max Plank Institute for Demographic Research (Germany). www.mortality.org, www.humanmortality.de
10. Школьников В.М., Милле Ф., Эртриш В., Валлен Ж. Современные тенденции смертности по причинам смерти в России: 1965–1994. На русс. и франц. Приложение на 2 диске-тах. – Paris. INED. 1996. 140 с.
11. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine // Health Phys. 2013. Vol. 104. № 4. P. 366–378.

**Lifetime Risk of Lung Cancer Death for Inhalation <sup>239</sup>Pu**

**M.E. Sokolnikov, V.V. Vostrotin, A.V. Ephimov, E.K. Vasilenko, S.A. Romanov**

Southern Ural Biophysics Institute. Chelyabinsk region, Ozersk, Russia. E-mail: sokolnikov@subi.su

M.E. Sokolnikov – Head of Lab., MD; V.V. Vostrotin – Head of Lab., PhD in Biological Sciences; A.V. Ephimov – Acting head of the division of radiation safety and dosimetry; E.K. Vasilenko – Chief, Southern Urals regional medical-dosimetry center; S.A. Romanov – Director, Southern Ural Biophysics Institute, PhD in Biological Sciences

**Abstract**

**Aim of the study:** Assessment of reliability of radiation safety standards after inhalation intake of Pu-239.

**Material and methods:** Using results of epidemiological study of lung cancer mortality in Mayak workers cohort and statistical data on all causes and lung cancer mortality in Russia the excess lifetime risk of lung cancer death was calculated.

**Results:** Current radiation safety standards restrict annual intake of Pu-239 class “S” at 1300 Bq/year level. The annual limit of intake is calculated in a way that the level of committed effective dose in 50 years after intake should not exceed 20 mSv. At the same time radiation safety standards restrict the level of the excess lifetime risk of cancer death at the level of 0.05 (for category A personnel) and/or annual increment of excess lifetime risk at the level 0.001. The equivalent dose of alpha-particles to the lung after 50 years of inhalation intake of Pu class “S” when calculated according to DOSE-2008 model will be 7 Sv. Given the pattern of dose accumulation over time after this scenario of Pu class “S” inhalation intake we calculated excess relative risk of lung cancer death, lifetime excess risk of lung cancer death and annual increment of excess lifetime risk. In 50 years of exposure to inhalation intake of Pu-239 class “S” the excess lifetime risk of lung cancer death will be 0.08, i.e. will exceed the 0.05 limit provided in radiation safety standards. The annual increment of the lifetime risk will exceed limit of 0.001, provided by the radiation safety standards, at age 45 and older.

These results demonstrate that the protection of personnel working with Pu-239 class “S” is insufficient in current radiation safety standards. One of the potential reasons is that lung contribution to total detriment for organism provided by ionizing radiation is averaged for all ages whereas for people of working age who contact to Pu at work this detriment doubles.

**Key words:** radiation safety standards, lifetime risk, inhalation intake, Plutonium-239

REFERENCES

1. Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009): Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 – M.: Federal’nyj centr gigieny i jepidemiologii Rospotrebnadzora. 2009. 100 s.
2. Pierce D.A., Shimizu Y., Preston D.L. et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors. Report 12. Part I. Cancer: 1950–1990. 1996 // Radiat. Res. 2012. Vol. 178. № 2. P. 61–87.
3. Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A. et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950–1997. 2003 // Radiat. Res. 2012. Vol. 178. № 2. P. 146–172.
4. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S. et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998 // Radiat. Res. 2007. Vol. 168. № 1. P. 1–64.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Ann. ICRP. 2007. Vol. 37. № 2–4. P. 1–332.
6. ICRP 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 60 // Ann. ICRP. 1991. Vol. 21. № 1–3.
7. Gilbert E.S., Sokolnikov M.E., Preston D.L. et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort // Radiat. Res. 2013. Vol. 179. № 3. P. 332–342.
8. Thomas D., Darby S., Fagnani F. et al. Definition and estimation of lifetime detriment from radiation exposures: principles and methods // Health Phys. 1992. Vol. 63. № 3. P. 259–272.
9. Human Mortality Database. University of California, Berkley (USA), Max Plank Institute for Demographic Research (Germany). www.mortality.org, www.humanmortality.de
10. Shkol’nikov V.M., Mille F., Jertrish V., Vallen Zh. Sovremennye tendencii smertnosti po prichinam smerti v Rossii: 1965–1994. Na rus. i franc. jazykah. Prilozhenie na dvuh disketah. – Paris, INED. 1996. 140 s.
11. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine // Health Phys. 2013. Vol. 104. № 4. P. 366–378.