

Апробация алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения при поступлении соединений плутония

Ефимов А.В., Сокольников М.Э., Соколова А.Б., Ишунина М.В., Аладова Е.Е.

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озёрск, Россия

Актуальность работы обусловлена необходимостью совершенствования методов контроля профессионального внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией радионуклидов с длительным периодом полувыведения. Целью работы являлась апробация методического документа, регламентирующего порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия на персонал. Решалась задача практического применения методики интерпретации результатов индивидуального дозиметрического контроля при контроле показателя годового приращения пожизненного избыточного риска смерти от радиационно-индуцированного рака. Материалы и методы: В основу системы контроля положен принцип ограничения доз облучения органов депонирования плутония в зависимости от возраста, в котором произошло облучение, а допустимые уровни воздействия плутония позволяют не превышать приемлемую величину радиационно-обусловленного риска в течение всего трудового стажа. На основании данных индивидуального дозиметрического контроля для 44 работников производственного объединения «Маяк» были выполнены расчеты годовых эквивалентных доз на критические органы, а также оценено радиационное воздействие по величине ожидаемой эффективной дозы. Результаты исследования и обсуждение: В большинстве случаев за периоды контроля были зарегистрированы поступления, которые привели к формированию доз внутреннего облучения выше уровня регистрации. Зарегистрированные значения пятидесятилетних ожидаемых эффективных доз, как и значения эквивалентных доз на критические органы, не превысили установленные пределы. В семи случаях эквивалентные дозы на критические органы оказались выше 60 мЗв, при этом годовой избыточный риск за год контроля не превышал 1×10^{-3} . Для всех работников контролируемой группы ни в один из периодов контроля не было зарегистрировано превышения приемлемой величины годового избыточного риска. Заключение: Выполненная тестовая эксплуатация методических указаний показала практическую применимость изложенных в документе методов, позволила выявить недостатки апробируемого подхода и сформулировать предложения по совершенствованию алгоритмов расчета.

Ключевые слова: соединения плутония, радиационный риск, внутреннее облучение, индивидуальный дозиметрический контроль, ожидаемая эффективная доза.

Введение

Методические указания 2.6.5.078-2018 «Порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия»¹ были разработаны в 2018 г. рабочей группой специалистов Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства (ФГБУН ЮУрФНКЦ МБ ФМБА России) по поручению Методического совета

по обеспечению радиационной безопасности в организациях Госкорпорации «Росатом». В 2018 г. методические указания прошли процедуру утверждения ФМБА России и введены в действие с 30 октября 2018 г.

Внедрение МУ 2.6.5.078-2018 в практику на предприятиях Госкорпорации «Росатом», а также в лабораториях дозиметрии внутреннего облучения ФМБА России является важным этапом создания системы контроля внутреннего облучения персонала при поступлении плутония, отвечающей требованиям принципов радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009².

¹ МУ 2.6.5.078-2018 «Порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия». Методическое обеспечение радиационного контроля в атомной отрасли. М., 2019. Т. 6. [Methodological guidelines MU 2.6.5.078-2018 "The procedure for organizing control of internal radiation from plutonium based on a risk-based approach to limiting radiation exposure". Methodological support for radiation control in the nuclear industry. Moscow; 2019. Vol. 6. (In Russ.)]

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 № 47 (зарегистрировано в Министерстве юстиции Российской Федерации 14.08.2009, регистрационный № 14534). [Norms of radiation safety (NRB-99/2009). Sanitary rules and norms SanPiN 2.6.1.2523-09. Approved by the resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of 07.07.2009 No. 47 (registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 14.08.2009, registration No. 14534). (In Russ.)]

Ефимов Александр Владимирович

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики

Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озёрск, Озёрское шоссе, д. 19; E-mail: ephimov@subi.su

В рассматриваемых методических указаниях для ограничения облучения персонала при различных путях поступления плутония использован риск-ориентированный подход, основанный на регламентируемом НРБ-99/2009 показателе годового приращения пожизненного избыточного риска смерти от радиационно-индуцированного рака [1, 2]. При ингаляционном поступлении плутония органами, подвергающимися воздействию излучения инкорпорированного плутония, являются прежде всего легкие, печень и костные поверхности, тогда как уровни действия излучения на другие органы и ткани пренебрежимо малы. Вследствие этого для оценки пожизненного избыточного риска смерти от онкологических заболеваний допустимо ограничиться оценкой риска, связанного с облучением органов основного депонирования. Требованиями НРБ-99/2009 установлено, что для персонала предел увеличения пожизненного риска смерти от связанных с действием ионизирующего излучения онкологических заболеваний не должен превышать 1×10^{-3} в год.

Изложенные в действующих в настоящее время методических указаниях 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования»³ подходы базируются на интерпретации результатов измерений физических величин, характеризующих внутреннее облучение, т.е. на восстановлении значений величин поступления радионуклидов за год и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной их поступлением в организм, с использованием соответствующих моделей и в рамках конкретных методик выполнения расчетов.

Цель исследования – апробация требований и положений МУ 2.6.5.078-2018 путем выполнения опытной эксплуатации методических указаний на основе данных индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) профессионального внутреннего облучения персонала Федерального Государственного Унитарного предприятия «Производственное объединение «Маяк» (ФГУП «ПО «Маяк»), в ходе которой необходимо рассмотреть задачи формирования групп персонала, включаемых в программу контроля при стандартных условиях облучения, и сравнить индивидуальные параметры внутреннего облучения, полученные при использовании подходов действующих МУ 2.6.1.065-2014 и внедряемых МУ 2.6.5.078-2018.

Материалы и методы

Для описания смертности от радиационно-обусловленных онкологических заболеваний в МУ 2.6.5.078-2018 используется модель избыточного относительного риска [3], полученная при анализе данных когорты персонала ФГУП «ПО «Маяк» [4]. Эта модель описывает зависимость смертности от рака определенной локализации от дозы радиационного воздействия, возраста, пола и фактора курения. По величине накопленной дозы в критическом органе за каждый год работы в контакте с соединениями плутония и зависимости показателя риска от дозы и достигнутого возраста оценивается показатель относительного избыточного риска за каждый год контакта с плутонием. При этом учитывается лаг-период, равный пяти

первым годам облучения, в течение которых величина риска, связанного с дозой, равна нулю. Разница между смертностью от рака критического органа и «фоновой» смертностью от рака этого органа соответствует величине пожизненного радиационно-индуцированного риска. При ингаляционном пути поступления оксида плутония критическим органом, определяющим величину пожизненного избыточного риска, являются легкие, а нитрата плутония – печень.

В основу системы контроля поступления плутония в МУ 2.6.5.078-2018 положен принцип ограничения доз облучения органов депонирования плутония в зависимости от возраста, в котором произошло облучение, а допустимые уровни воздействия плутония позволяют не превысить приемлемую величину радиационно-обусловленного риска в течение всего трудового стажа (50 лет). В МУ 2.6.5.078-2018 представлены таблицы, позволяющие по измеренной активности в суточных количествах мочи (СКМ) рассчитать дозу облучения критического для данного пути поступления органа депонирования плутония, а по ней – величину годового избыточного радиационного риска на календарный год контроля облучения от поступивших соединений плутония.

Для оценки суммарных доз облучения при воздействии на работника нескольких источников, а также для учета доз в карточке учета индивидуальных доз работника, годовой избыточный риск, сформированный за счет облучения от поступления плутония, переводится в годовую эффективную дозу, равнозначную годовой эффективной дозе внешнего облучения.

Таким образом, МУ 2.6.5.078-2018 устанавливает требования к планированию, организации и проведению ИДК внутреннего облучения работников, занятых обращением с плутонием, в случаях поступления радионуклида в организм при стандартных условиях и при отклонении от нормальных условий эксплуатации, а также к методам определения индивидуальных значений контролируемых при внутреннем облучении величин. Решение задачи контроля годового избыточного риска состоит из двух этапов:

- проведение измерений содержания плутония в выделениях или других пробах биологического происхождения;
- интерпретация результатов указанных измерений в терминах эквивалентных доз на критические органы, с использованием соответствующих моделей в рамках конкретных методик выполнения расчетов, и сопоставления их с предельными значениями, обеспечивающими не превышение приемлемой величины радиационного риска.

Целью первого этапа опытной эксплуатации МУ 2.6.5.078-2018 являлась отработка вопросов формирования группы работников для их включения в программу контроля для оценки предельно допустимых значений эквивалентных доз облучения критических органов и своевременного выявления превышения предельно допустимых значений эквивалентных доз облучения критических органов, формирующих годовой избыточный риск более 1×10^{-3} . Включению в программу контроля подлежали работники, у которых результат текущего, операционного или подтверждающего контроля показывает, что содержание плутония в СКМ превышает предел детектирования используемого метода измерения.

³МУ 2.6.1.065-2014 «Дозиметрический контроль профессионального внутреннего облучения. Общие требования». М.: ФМБА России, 2018. 46 с. [Methodological guidelines MU 2.6.1.065-2014 "Dosimetric control of occupational internal radiation. General requirements". Moscow: FMBA of Russia; 2018. 46 p. (In Russ.)]

Для работников, подвергавшихся хроническому ингаляционному поступлению, рассматривались результаты текущего индивидуального дозиметрического контроля за период, начиная с 2010 г. Работники в указанный период времени должны были быть обеспечены несколькими индивидуальными обследованиями на содержание плутония в СКМ. Как минимум одно из таких обследований должно было выявить содержание плутония в СКМ выше предела обнаружения используемого метода измерения. Определение плутония в биологических пробах выполнялось согласно МВИ «Методика измерений активности изотопов плутония, америция и урана в пробах биосубстратов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой»⁴. Задействованный метод анализа позволяет определять активность ²³⁹Pu в СКМ на уровне 0,5 мБк.

Для учета зависимости коэффициента риска от возраста, в котором формируется доза внутреннего облучения,

в группе для анализа должны были присутствовать работники в широком диапазоне возрастов на дату формирования облучения.

На основании анализа результатов текущего индивидуального дозиметрического контроля персонала ФГУП «ПО «Маяк» была сформирована группа работников в количестве 44 человек, в пробах биосубстратов которых на протяжении всех периодов контроля, начиная с 2010 г., были выявлены содержания плутония выше предела обнаружения метода измерения. Структура группы в разрезе занятости на том или ином производстве представлена в таблице 1.

Распределение представителей группы по основным подразделениям радиохимического и плутониевого производств представлено на рисунке 1. В дальнейшем подразделение производства, к которому относился работник, учитывалось в системе оценки доз внутреннего облучения, как характеризующее тип поступающих соединений плутония по скорости перехода из легких в кровь.

Таблица 1. Распределение представителей группы по производствам ФГУП «ПО «Маяк»

[Table 1. Distribution of the group's representatives by production of FSUE Mayak PA]

Производство [Production]	Количество работников [Number of workers]
Радиохимическое [Radiochemical Production]	20
Плутониевое [Plutonium Production]	18
Приборно-механический завод [Instrument and Mechanical plant]	2
Радиоизотопное [Radioisotope production]	2
Центральная заводская лаборатория [Central Plant Laboratory]	2
Всего [Total]	44

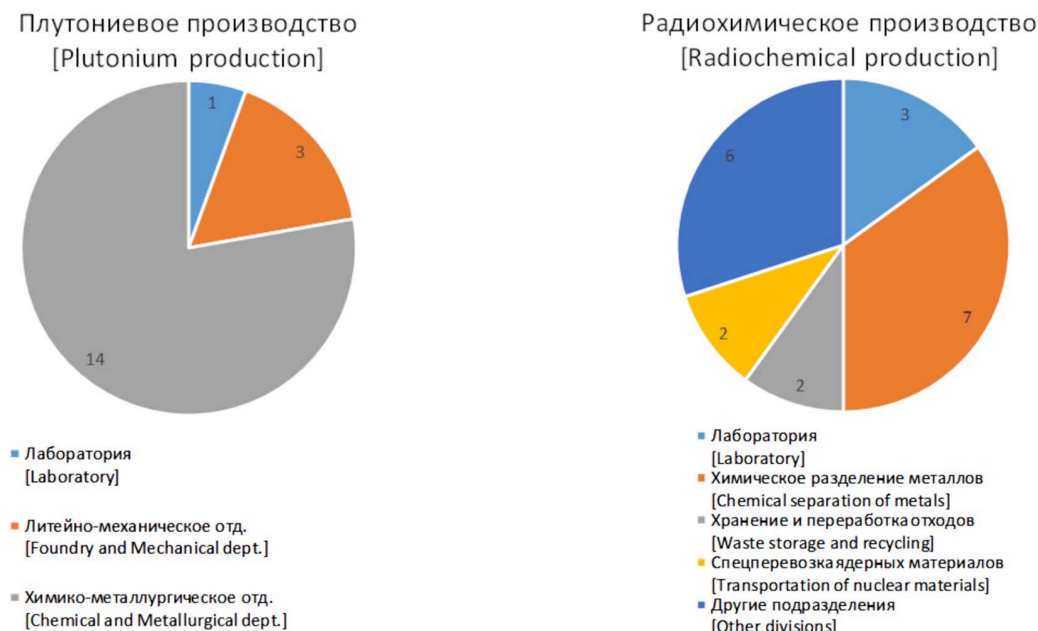


Рис. 1. Распределение работников по подразделениям производств

[Fig. 1. Distribution of employees by production divisions]

⁴ СП-26-3-2023 Методика измерений активности изотопов плутония, америция и урана в пробах биосубстратов альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой (Свидетельство об аттестации № 26-3РА.RU.311952-2024). Озерск, 2023. 25 с. [SP-26-3-2023 A method for measuring the activity of plutonium, americium and uranium isotopes in biosubstrate samples using the alpha spectrometric method with radiochemical preparation (Certificate of Attestation No. 26-3РА.RU.311952-2024). Ozyorsk; 2023. 25 p. (In Russ.)]

Возраст получения дозы внутреннего облучения от инкорпорированного плутония, а также продолжительность контакта с альфа-излучающими аэрозолями, являются одними из основных параметров, включенных в алгоритм

оценки индивидуального риска согласно МУ 2.6.5.078-2018. Структура группы по указанным параметрам представлена на рисунках 2 и 3.

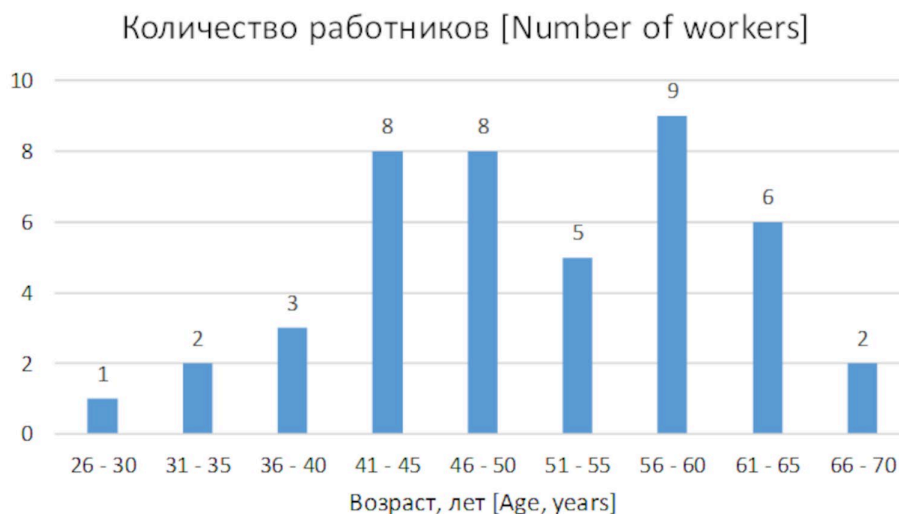


Рис. 2. Распределение работников по возрасту на момент последнего обследования или дату увольнения
[Fig. 2. Distribution of employees by age at the time of the last survey or the date of resignation]



Рис. 3. Распределение работников по стажу на момент последнего обследования или дату увольнения
[Fig. 3. Distribution of employees by duration of employment at the time of the last survey or the date of resignation]

Как следует из данных рисунков 2 и 3, представители группы принадлежат широкому диапазону значений возраста на момент облучения и продолжительности контакта с аэрозолями плутония. Большинство работников начали профессиональную деятельность в возрасте до 30 лет. Сведения о возрасте начала профессиональной деятельности для лиц, включенных в сформированную группу, представлены на рисунке 4.

Распределение числа работников по количеству индивидуальных обследований, охватывающий весь трудовой

стаж, представлено на рисунке 5.

На рисунке 6 представлены сведения о распределении продолжительности периодов контроля в сформированной группе за период, начиная с 2010 г. Под периодом контроля понимается промежуток времени между двумя последовательными индивидуальными обследованиями. Как следует из данных рисунка 6, наибольшее количество периодов контроля методом биофизического обследования укладывается в диапазон, рекомендуемый МУ 2.6.1.065-2014.



Рис. 4. Распределение работников по возрасту на момент начала работы
[Fig. 4. Distribution of employees by age of starting work]



Рис. 5. Распределение количества работников по количеству обследований
[Fig. 5. Distribution of the number of employees by the number of surveys]



Рис. 6. Распределение количества периодов контроля по частоте их проведения
[Fig. 6. Distribution of the number of control periods by their frequency]

Результаты

Для всех представителей сформированной группы персонала ФГУП «ПО «Маяк» по результатам индивидуальных обследований для каждого периода контроля работника были рассчитаны значения ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения за 50 лет (далее – ОЭД(50)), обусловленных поступлением плутония. Для 44 включенных в исследование работников общее количество периодов контроля составило 151. Расчеты выполнялись с использованием программного обеспечения ММК-02, реализующего методику радиационного контроля «Методика расчета эффективной дозы внутреннего облучения персонала по результатам измерений активности радионуклидов в теле человека и в биопробах» и рекомендованные публикациями № 66 и 67 МКРЗ [5, 6] модели биокинетики актинидов.

При расчетах ОЭД(50) в отсутствии фактических данных об условиях облучения были приняты следующие условия:

- тип соединения при ингаляции – «П» (промежуточные) или «М» (медленные) в зависимости от профмаршрута работника;
- медианный по активности аэродинамический диаметр аэрозоля (АМАД) – 1 мкм;
- однократное поступление, момент поступления случайный, равновероятно распределенный в пределах периода контроля.

Исходными данными для расчета являлись результаты регулярных измерений скорости выведения плутония из организма, определенной путем измерения активности плутония в СКМ. Для работников с результатами измерений содержания плутония в пробах СКМ ниже предела обнаружения (Lc) метода измерения было использовано значение предела обнаружения содержания плутония в пробах СКМ.

Обобщенные результаты расчетов в виде распределения приписанных к периоду контроля значений ОЭД(50) внутреннего облучения, обусловленного хроническим ингаляционным поступлением плутония, представлены на рисунке 7.



Рис. 7. Распределение значений ОЭД(50) [Fig. 7. Distribution of CEDE (He,50)]

Как следует из данных рисунка 7, за все рассмотренные периоды контроля в большинстве случаев были зарегистрированы поступления, которые привели к формированию доз внутреннего облучения выше уровня регистрации. Зарегистрированные значения ОЭД(50) для представителей сформированной группы персонала не превысили установленные НРБ-99/2009 пределы доз.

На основании данных ИДК профессионального внутреннего облучения были выполнены расчеты дозиметрических величин, используемых при применении риск-ориентированного подхода к оценке радиационного воздействия, а именно годовых эквивалентных доз на критические органы для рассматриваемого пути поступления. Значения годовой эквивалентной дозы на критические органы при поступлении плутония через органы дыхания представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения пределов годовой эквивалентной дозы на критические органы при ингаляционном поступлении плутония

[Table 2. The values of the annual equivalent dose limits for critical organs with inhaled plutonium intake]

Тип соединения [Type of compound]	Критический орган [Critical organ]	Значение ПД, Н _{год} ^{крит.орган} , мЗв Limit of H(T, 1), mSv
«М» (медленные) [“S” (slow)]	Легкие [Lung]	60
«П» (промежуточные) [“M” (medium)]	Печень [Liver]	135

При выполнении оценок использовалась методика, изложенная в МУ 2.6.5.078-2018, согласно которой эквивалентные дозы на критические органы оцениваются с использованием биокинетических моделей дозиметрической системы «MWDS-2008» [7] и на основании данных о содержании радионуклида в СКМ при различных сценариях поступления плутония в организм работника. Расчеты выполнялись в соответствии с требованиями положений МУ 2.6.5.078-2018 по расчету эквивалентных доз на критические органы по результату измерения активности плутония в СКМ, годового избыточного риска и переводу годового избыточного

риска в величину годовой эффективной дозы. Обобщенные результаты расчетов в виде распределения значений годовых эквивалентных доз на критические органы представлены на рисунке 8.

Как следует из данных рисунка 8, на большинстве периодов контроля значения эквивалентных доз на критические органы не превышали установленных пределов. В течение семи периодов контроля были зарегистрированы эквивалентные дозы на критические органы выше 60 мЗв. Сведения об указанных случаях представлены в таблице 3.



Рис. 8. Распределение значений годовых эквивалентных доз на критический орган [Fig. 8. Distribution of annual equivalent doses to critical organ]

Таблица 3. Сведения о случаях превышения эквивалентных доз на критические органы [Table 3. Information on cases of excess of equivalent doses to critical organs]

Номер случая [Case number]	Год начала работы [Year of employment start]	Год контроля [Year of monitoring]	Возраст на год контроля, лет [Age for the year of control, years]	Тип соединения [Type of compound]	Критический орган [Critical organ]	Эквивалентная доза на критический орган, мЗв [Equivalent dose for critical organ, mSv]
75520	1992	2014	45			65
61290	1978	2015	55	П [M]	Печень [Liver]	63
		2016	56			100
82720	1985	2015	53			120
		2017	55			81
84884	1997	2015	39	М [S]	Легкое [Lung]	110
		2021	44			100

Как следует из данных таблицы 3, у одного работника (случай 84884) из контролируемой группы, контактирующего с труднорастворимыми соединениями плутония, было зарегистрировано превышение предела годовой эквивалентной дозы на легкие, при этом годовой избыточный риск за год контроля не превышал 1×10^{-3} .

На рисунке 9 представлено распределение значений годового избыточного риска за годы контроля среди работников контролируемой группы.

Для всех работников контролируемой группы, подвергавшихся хроническому ингаляционному поступлению плутония, ни в один из периодов контроля не было зарегистрировано превышения приемлемой величины годового избыточного риска.

На рисунке 10 представлено сравнение результатов контроля с использованием подхода НРБ-99/2009, нормирующего при внутреннем облучении значение ОЭД(50), и риск-ориентированного подхода, ограничивающего значение годового избыточного риска за каждый год контроля (на рисунке 10 обозначен как ELR). В группу сравнения включены случаи, в которых работники контролировались ежегодно на протяжении нескольких лет подряд.

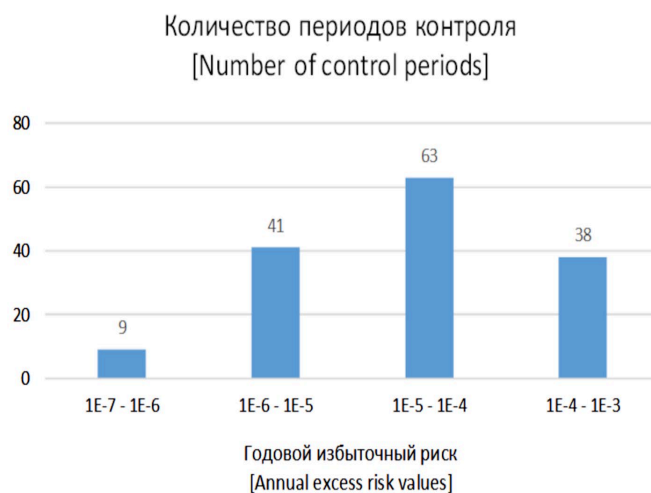


Рис. 9. Распределение значений годового избыточного риска [Fig. 9. Distribution of annual excess risk values]

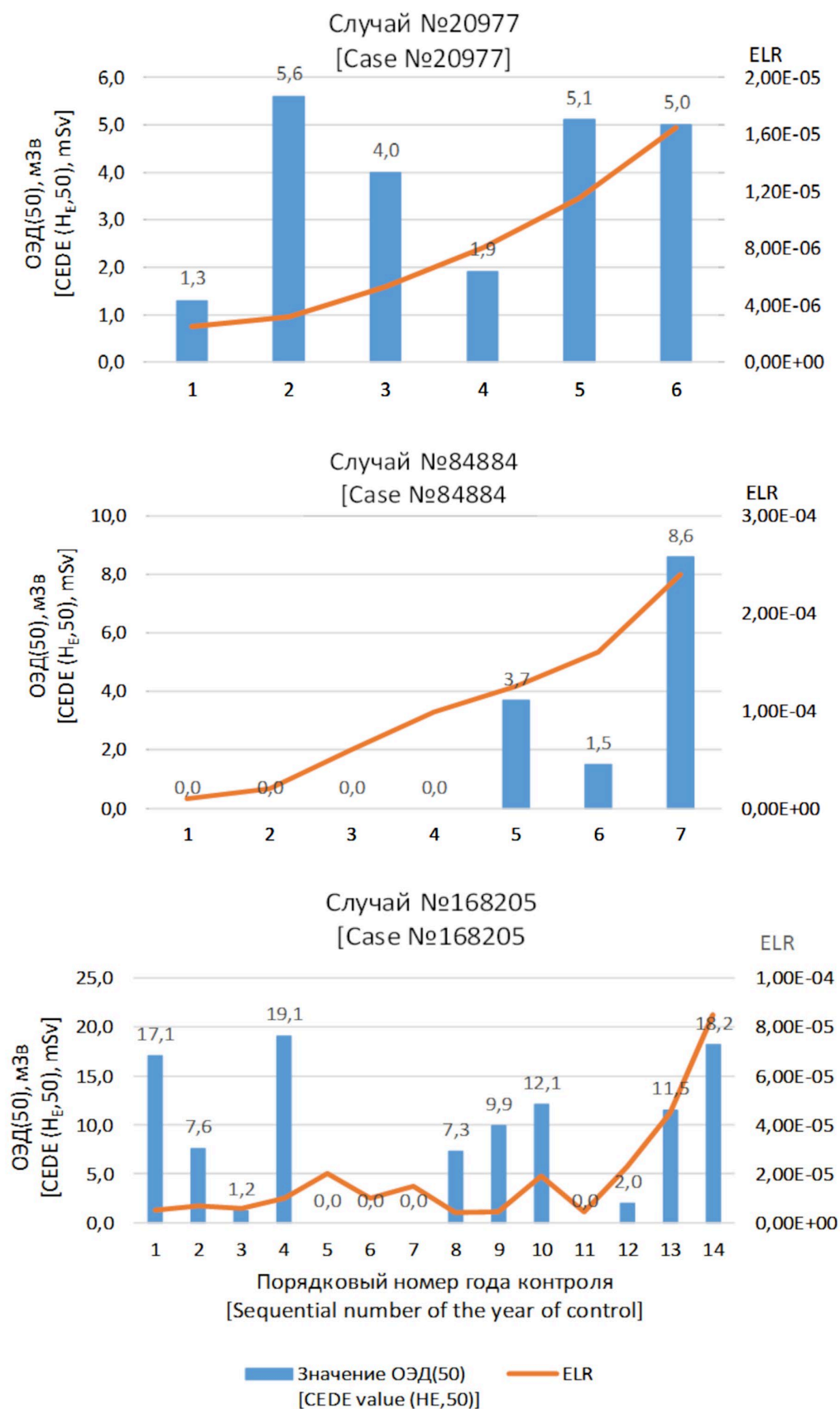


Рис. 10. Сравнение результатов контроля в терминах ОЭД(50) и годового избыточного риска [Fig. 10. Comparison of control results in terms of CEDE (H_{E,50}) and ELR]

Как следует из данных рисунка 10, значения контролируемых величин при рассматриваемых подходах к нормированию внутреннего облучения от плутония не превышают установленных пределов. Для случая №168205 при контроле облучения в терминах ожидаемой эффективной дозы отмечены периоды контроля, в которых значение ОЭД(50) приближалось к пределу дозы, равному 20 мЗв, тогда как величины годового избыточного риска оставались много ниже установленного предела в 1×10^{-3} .

Обсуждение

Для целей апробации алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией плутония, в соответствии с положениями МУ 2.6.5.078-2018 были сформированы группы персонала, подлежащие специальному контролю.

В группе персонала ФГУП «ПО «Маяк», подвергавшегося облучению в контролируемых условиях, превышенной приемлемой величины годового избыточного риска за периоды контроля не выявлено. Значение указанного показателя было много ниже установленного в Нормах радиационной безопасности предела увеличения пожизненного риска смерти от онкологических заболеваний, связанных с действием ионизирующего излучения. Вместе с тем в этой же группе были отмечены случаи, когда величина годовой дозы при монофакторном воздействии приближалась к значению предела, установленного НРБ-99/2009.

Выполненная тестовая эксплуатация МУ 2.6.5.078-2018 показывает практическую применимость изложенных в документе методик оценки радиационного воздействия. Практическое применение положений МУ 2.6.5.078-2018 позволило выявить недостатки апробируемого подхода и сформулировать предложения о необходимости выполнить детализацию ряда алгоритмов расчета для достижения универсальности в интерпретации широкого разнообразия случаев индивидуальных программ обследования, когда отсутствуют компьютерные программы для расчетов параметров облучения, а их оценки можно выполнить только по табулированным данным со значительной дискретностью.

Заключение

В целях улучшения системы радиационной защиты и ограничения доз внутреннего облучения работников плутониевых производств Госкорпорации «Росатом» посредством установления дозовых пределов, поддерживающих радиационный риск на социально приемлемом уровне, установленном в НРБ-99/2009, специалистами ФГБУН ЮрФНКЦ МБ ФМБА России выполнена опытная эксплуатация МУ 2.6.5.078-2018 на базе результатов ИДК профессионального внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк».

Широкому внедрению разработанных и апробированных МУ 2.6.5.078-2018 будет способствовать также внедрение разработанного в ФГБУН ЮрФНКЦ МБ ФМБА России регламента (типового порядка) ИДК внутреннего облучения, основанного на риск-ориентированном подходе, и разработка компьютерных программ, реализующих алгоритмы формирования групп контроля и интерпретацию результатов индивидуальных обследований.

Внедрение разработанных МУ 2.6.5.078-2018 и Регламента в практику на предприятиях и учреждениях Госкорпорации «Росатом», а также в лабораториях дозиметрии внутреннего облучения ФМБА России, является важным этапом создания системы контроля внутреннего облучения персонала при поступлении плутония, отвечающей требованиям принципов радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Ефимов А.В. – общее научное руководство исследованием, разработка дизайна исследования, определение цели и задачи, систематизация, подготовка и анализ первичных материалов исследования, написание текста статьи.

Сокольников М.Э. – проведение расчетов и анализ полученных оценок годового избыточного риска.

Соколова А.Б. – анализ источников информации, выборка данных, обобщение и обработка материалов исследования, редактирование текста статьи.

Ишунина М.В. – подготовка, анализ и систематизация результатов индивидуального дозиметрического контроля персонала.

Аладова Е.Е. – подготовка, анализ и систематизация данных об условиях и истории облучения персонала.

Благодарности

Авторы признательны А.В. Аклееву (генеральному директору ФНКЦ РБ ФМБА России) за общее и научное руководство. Авторы благодарны рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке ФМБА России в рамках выполнения прикладной научно-исследовательской работы: шифр «ИДК ГХК 25».

Литература

1. Василенко Е.К., Сокольников М.Э., Востротин В.В. и др. Ограничение профессионального облучения при ингаляционном поступлении плутония // Радиация и риск. 2015. Т.24, № 3. С. 51-58.
2. Аладова Е.Е., Василенко Е.К., Ефимов А.В. и др. 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.
3. 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 // Radiation Research. 2013. Vol. 179, No 3. P. 332-342. DOI: 10.1667/RR3054.1.
4. Ефимов А.В., Соколова А.Б. История и программа биофизических обследований в эпидемиологической когорте работников ФГУП «ПО «Маяк» // Радиация и риск. 2024. Т. 33, № 4. С. 131-143. DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-4-131-143.
5. ICRP Publication 66 Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection // Annals of the ICRP. 1994. Vol. 24, No 1-3. P. 8-120.

6. ICRP Publication 67 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. // Annals of the ICRP. 1993. Vol. 23, No 3-4. P. 121-140. plutonium activity in urine // Health Physics. 2013. Vol. 104, No 4. P. 366-378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60. Поступила: 01.09.2025
7. 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

Ефимов Александр Владимирович – начальник научно-исследовательского отдела радиационной безопасности, научный сотрудник Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства. Адрес для переписки: 456783, Россия, Челябинская область, Озерск, Озерское шоссе, д. 19; E-mail: ephimov@subi.su
ORCID: 0000-0003-1110-6559

Сокольников Михаил Эдуардович – доктор медицинских наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией исследований онкологических эффектов профессионального облучения Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID: 0000-0001-9492-4316

Соколова Александра Борисовна – кандидат биологических наук, главный научный сотрудник, курирующий вопросы радиационной безопасности Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID: 0000-0002-6036-4178

Ишунина Мария Владимировна – заведующий научно-исследовательской лабораторией радиационных измерений, младший научный сотрудник Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID: 0000-0002-0737-4131

Аладова Елена Евгеньевна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского регионального аварийного медико-дозиметрического центра Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия
ORCID: 0000-0003-3277-0512

Для цитирования: Ефимов А.В., Сокольников М.Э., Соколова А.Б., Ишунина М.В., Аладова Е.Е. Апробация алгоритмов риск-ориентированного подхода к контролю профессионального внутреннего облучения при поступлении соединений плутония // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 91–101. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-91-101

Approbation of algorithms for a risk-based approach to the control of professional internal exposure to plutonium compounds

Alexander V. Efimov, Mikhail E. Sokolnikov, Alexandra B. Sokolova, Mariya V. Ishunina, Elena E. Aladova

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical-Biological Agency, Ozyorsk, Russia

The relevance of the work is due to the need to improve the methods of control of professional internal exposure due to incorporated radionuclides with a long biological half-life. The aim of the work was to test a methodical document regulating the organization of internal exposure control due to plutonium based on a risk-based approach to limiting radiation exposure to personnel. The task of the work was a practical application of the method of interpretation of the results of individual dosimetric control in monitoring the annual increment of the lifetime excess risk of death from radiation-induced cancer. Materials and Methods: The control system is based on the principle of limiting the doses of radiation to plutonium storage organs, depending on the age at which the exposure occurred, and the permissible levels of plutonium exposure make it possible not to exceed the acceptable level of the radiation-related risk throughout the work experience. Based on an array of data from individual dosimetric monitoring of 44 employees of the Mayak production association, calculations of annual equivalent doses to critical organs were performed, and the radiation effect on personnel was estimated based on the expected effective dose. Results and Discussion: In most cases, during the control periods, admissions were recorded that led to the formation of internal radiation doses above the registration level. The registered values of the expected effective doses for fifty years, as well as the values

Alexander V. Efimov

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics

Address for correspondence: 19, Ozyorskoe Shosse, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: ephimov@subi.su

of equivalent doses for critical organs, did not exceed the established limits. In seven cases, the equivalent doses to critical organs were higher than 60 mSv, while the annual excess risk for the year of control did not exceed 1×10^{-3} . For all employees of the controlled group, no excess of the acceptable annual risk was recorded in any of the control periods. Conclusion: The completed test operation of the methodological guidelines showed the practical applicability of the methods described in the document, made it possible to identify the shortcomings of the tested approach and formulate proposals for improving the calculation algorithms.

Key words: plutonium compounds, radiation risk, internal exposure, individual dosimetry monitoring, committed effective dose equivalent.

Authors' personal contribution

Efimov A.V. – general scientific management of research, development of research design, definition of goals and objectives, systematization, preparation and analysis of primary research materials, writing the text of the article.

Sokolnikov M.E. – carrying out calculations and analyzing the estimates of radiation risk.

Sokolova A.B. – analysis of information sources, data sampling, synthesis and processing of research materials, editing of the text of the article.

Ishunina M.V. – preparation, analysis and systematization of the results of individual dosimetric control of personnel.

Aladova E.E. – preparation, analysis and systematization of data on the conditions and history of personnel exposure.

Acknowledgements

The authors are grateful to A.V. Akleev (General Director of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the FMBA of Russia) for general and scientific guidance. The authors thank to the reviewers for their work.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest.

Sources of funding

The work was carried out with the financial support of the FMBA of Russia as part of the applied research work: code "IDK GHK 25".

References

1. Vasilenko EK, Sokolnikov ME, Vostrotnin VV, Efimov AV, Aladova EE, Romanov SA. Limitation of occupational exposure to inhaled plutonium. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2015;24(3): 51-58. (In Russian).
2. Aladova EE, Vasilenko EK, Efimov AV, Vostrotnin VV, Sokolnikov ME, Romanov SA. Methodology for Rationing Internal Exposure from Plutonium: Problems and Solution. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;67(6): 36-43. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-6-36-43.
3. Gilbert ES, Sokolnikov ME, Preston DL, Schonfeld SJ, Schadilov AE, Vasilenko EK, et al. Lung cancer risks from plutonium: an updated analysis of data from the Mayak worker cohort. *Radiation Research*. 2013;179(3): 332-342. DOI: 10.1667/RR3054.1.
4. Efimov AV, Sokolova AB. History and program of biophysical examinations in the epidemiological cohort of employees of FSUE "Mayak PA". *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2024;33(4): 131-143. (In Russian). DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-4-131-143.
5. ICRP Publication 66 Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. *Annals of the ICRP*. 1994;24(1-3): 8-120.
6. ICRP Publication 67 Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 2 Ingestion Dose Coefficients. *Annals of the ICRP*. 1993;23(3-4): 121-140.
7. Khokhryakov VV, Khokhryakov VF, Suslova KG, Vostrotnin VV, Vvedensky VE, Sokolova AB, et al. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine. *Health Physics*. 2013;104(4): 366-378. DOI: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60.

Received: September 01, 2025

For correspondence: Alexander V. Efimov – Head of Department, Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency (Ozyorskoe shosse, 19, Ozyorsk, Chelyabinsk Region, 456783, Russia; E-mail: ephimov@subi.su

ORCID: 0000-0003-1110-6559

Mikhail E. Sokolnikov – Doctor of Medical Sciences, Head of the Research Laboratory for Research on Oncological Effects of occupational radiation, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0001-9492-4316

Alexandra B. Sokolova – Candidate of Biological Sciences, Chief Researcher in charge of radiation safety issues, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0002-6036-4178

Mariya V. Ishunina – Head of Radiation Measurement Laboratory, Junior Researcher, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0002-0737-413

Elena E. Aladova – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Southern Ural Regional Emergency Medical Dosimetric Center, Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, Ozyorsk, Russia

ORCID: 0000-0003-3277-0512

For citation: Efimov A.V., Sokolnikov M.E., Sokolova A.B., Ishunina M.V., Aladova E.E. Approbation of algorithms for a risk-based approach to the control of professional internal exposure to plutonium compounds. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 91–101. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-91-101