



Паринов О.В., Семенова М.П., Шандала Н.К., Лягинская А.М., Метляев Е.Г.,
Купцов В.В., Богданов И.И.

Современные представления о радиобиологических эффектах плутония и урана (по материалам 150-й публикации МКРЗ)

ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства», 123098, Москва, Россия

Введение. В статье рассматриваются риски для здоровья населения, связанные с воздействием плутония и урана, приведённые в Публикации 150 МКРЗ и актуальные в условиях развития технологий, производства новых типов ядерного топлива.

Риск возникновения рака в результате облучения плутонием. Воздействие плутония происходит преимущественно в производственных условиях. После ингаляционного поступления и осаждения в дыхательных путях плутоний выводится путём переноса частиц в пищеварительный тракт и лимфатические узлы, а также при всасывании в кровь. Основной риск, связанный с воздействием плутония, – развитие рака лёгких. Сравнение пожизненного избыточного риска смертности от рака лёгких, обусловленного внешним гамма-излучением (на основе пожизненного обследования жителей Японии, выживших после атомной бомбардировки) и внутренним облучением альфа-частицами плутония (на основе исследования работников ПО «Маяк»), показало, что при одной и той же дозе, поглощённой лёгкими, риск, связанный с облучением альфа-частицами плутония, больше, чем риск, связанный с внешним гамма-облучением, примерно в 15–16 и 19–22 раза для моделей избыточного относительного и избыточного абсолютного риска, соответственно.

Риск возникновения рака в результате облучения ураном. В настоящее время имеются очень слабые доказательства связи дозы внутреннего облучения, обусловленного воздействием урана, и риска возникновения онкологических заболеваний. В Публикации 150 представлен критический обзор Доклада НКДАР ООН за 2016 г. (2017 г.) и обсуждаются недавние эпидемиологические исследования. На этапах ядерного топливного цикла возникает разная опасность для здоровья, учитывая различие форм урана, присутствующих на каждой стадии. Оценка доз от воздействия урана для работников, занятых в ядерно-топливном цикле, затруднена из-за относительно быстрого выведения урана из кровотока, изменчивости воздействия соединений урана и различий в методах, используемых для контроля внутреннего облучения. Опираясь на опубликованные данные исследований, невозможно количественно оценить риск возникновения рака по дозам на отдельные органы и ткани, обусловленным воздействием урана.

Заключение. Исследования, направленные на изучение свойств новых видов ядерного топлива, должны учитывать всесторонние данные, представленные в Публикации МКРЗ 150.

Ключевые слова: плутоний; уран; радон; радиационный риск; оценка риска; радиобиологические эффекты; рак лёгких; Публикация МКРЗ 150

Для цитирования: Паринов О.В., Семенова М.П., Шандала Н.К., Лягинская А.М., Метляев Е.Г., Купцов В.В., Богданов И.И. Современные представления о радиобиологических эффектах плутония и урана (по материалам 150-й публикации МКРЗ). *Гигиена и санитария*. 2023; 102(2): 175–180. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-175-180> <https://elibrary.ru/ltxyiu>

Для корреспонденции: Метляев Евгений Георгиевич, канд. мед. наук, зав. лаб. мониторинга здоровья населения ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123098, Москва. E-mail: metlyaev@mail.ru

Участие авторов: Паринов О.В. – концепция и дизайн исследования, сбор материала и обработка данных, статистическая обработка, написание текста, ответственность за целостность всех частей статьи; Семенова М.П. – сбор материала и обработка данных, написание текста; Шандала Н.К. – редактирование, ответственность за целостность всех частей статьи; Лягинская А.М., Метляев Е.Г., Купцов В.В., Богданов И.И. – сбор материала и обработка данных, статистическая обработка. Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 08.08.2022 / Принята к печати: 08.12.2022 / Опубликована: 25.03.2023

Oleg V. Parinov, Mariya P. Semenova, Natalya K. Shandala, Antonina M. Lyaginskaya,
Evgeny G. Metlyaev, Vladimir V. Kuptsov, Iliya I. Bogdanov

Current concepts of the radio-biological effects of plutonium and uranium (Based on ICRP Publication 150)

State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, 123098, Russian Federation

Introduction. The article discusses the health risks associated with exposure to plutonium and uranium, given in ICRP Publication 150 and relevant in the context of the development of technologies, the production of new types of nuclear fuel.

Cancer risk from plutonium exposure. Exposure to plutonium occurs predominantly in industrial settings. After inhalation and deposition in the respiratory tract, plutonium is eliminated by particle transport to the digestive tract and lymph nodes, and by absorption into the blood. The main risk associated with exposure to plutonium is lung cancer. Comparing the lifetime excess risk of mortality from lung cancer due to external gamma radiation (based on a lifetime survey of Japanese residents who survived the atomic bombing) and internal exposure to plutonium alpha particles (based on a study of Mayak employees), for the same absorbed dose to the lungs, the risk associated with exposure to plutonium alpha particles was found to be greater than the risk associated with external gamma exposure by about 15–16 and 19–22 times.

Cancer risk from exposure to uranium. At present, there is very little evidence to suggest a relationship between internal dose due to uranium exposure and cancer risk. ICRP Publication 150 provides a critical review of the UNSCEAR Report 2016 (2017) and discusses recent epidemiological studies. There are different health hazards at different stages of the nuclear fuel cycle, given the different forms of uranium present at each stage. Estimating doses from exposure to uranium for workers in the nuclear fuel cycle is difficult due to the relatively rapid elimination of uranium from the bloodstream, variability in exposure to uranium compounds, and differences in the methods used to control internal exposure. Based on published research data, it is not possible to quantify the risk of cancer from uranium by doses to individual organs/tissues.

Conclusion. Research was carried out as a part of the study of the properties of new types of nuclear fuel should take into account the comprehensive data presented in ICRP Publication 150.

Keywords: plutonium; uranium; radon; radiation risk; risk assessment; radio-biological effects; lungs' cancer; ICRP Publication 150

For citation: Parinov O.V., Semenova M.P., Shandala N.K., Lyaginskaya A.M., Metlyaev E.G., Kuptsov V.V., Bogdanov I.I. Current concepts of the radio-biological effects of plutonium and uranium (based on ICRP Publication 150). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(2): 175-180. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-2-175-180> <https://elibrary.ru/ltyxiu> (In Russian)

For correspondence: Evgeny G. Metlyaev, MD, PhD., Head of the Laboratory of public health monitoring of the State Research Center – Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow. 123098, Russian Federation. E-mail: metlyaev@mail.ru

Information about the authors:

Parinov O.V., <https://orcid.org/0000-0003-2370-170X> Semenova M.P., <https://orcid.org/0000-0003-0904-0415>
Shandala N.K., <https://orcid.org/0000-0003-1290-3082> Lyaginskaya A.M., <https://orcid.org/0000-0003-2205-5670>
Metlyaev E.G., <https://orcid.org/0000-0002-4578-8052> Bogdanov I.I., <https://orcid.org/0000-0002-1195-3515>

Contribution: Parinov O.V. — the concept and design of the study, the collection of material and data processing, statistical processing, writing the text, responsibility for the integrity of all parts of the article; Semenova M.P. — collection of material and data processing, writing the text; Shandala N.K. — editing, responsibility for the integrity of all parts of the article; Lyaginskaya A.M., Metlyaev E.G., Kuptsov V.V., Bogdanov I.I. — collection of material and data processing, statistical processing. All co-authors — approval of the final version of the article.

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

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: August 8, 2022 / Accepted: December 8, 2022 / Published: March 25, 2023

Введение

В мировой ядерной энергетике в последние годы рассматриваются новые технологии замыкания ядерного топливного цикла на основе реакторов на быстрых нейтронах. В нашей стране в рамках проектного направления «Прорыв» разрабатываются новые технологии смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. Основным технологическим решением нового топлива является использование в его производстве отработанного оружейного плутония и регенерированного урана [1].

С 2018 г. нами проводятся радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива на АО «Сибирский химический комбинат» [2, 3], в ходе которых изучены все параметры внешнего и внутреннего облучения персонала, оценены дозы облучения. При этом отмечается, что характеристики химического, морфологического и дисперсного состава аэрозольных частиц могут существенно повлиять на процессы биокинетики СНУП аэрозолей и, следовательно, на степень радиологической опасности по сравнению с принятыми Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) радиобиологическими моделями для плутония и урана. Наряду с радиационно-гигиеническими исследованиями отработки новой технологии производства СНУП топлива изучаются особенности возможного влияния такого экспериментального производства на состояние здоровья персонала [4].

Данных о токсичности и биологической эффективности нового топлива в настоящее время нет, разработка ведётся при отсутствии гигиенических нормативов непосредственно для СНУП. Поэтому представляет интерес рассмотрение биологических эффектов возможного влияния на человека плутония и (или) урана, а также их соединений в различных химических формах.

За последние десятилетия были опубликованы результаты обследований лиц, подвергшихся воздействию радиоизотопов плутония, урана и радионуклидов, которые распределяются в организме, особенно в лёгких, иначе, чем радон и его производные. В частности, радон и продукты его распада обуславливают дозы в первую очередь на верхние отделы лёгких (bronхи) и кратковременно, тогда как плутоний и уран (особенно плутоний) обуславливают дозы на всё лёгкое целиком и в течение длительного времени.

В недавно вышедшей Публикации 150 МКРЗ содержится первый за последние более чем 30 лет всеобъемлющий обзор рисков для здоровья, связанных с воздействием плутония и урана, приводятся расчёты избыточного пожизненного риска смертности от рака лёгких, обсуждаются неопределённости, связанные с этими результатами, и их возможное влияние на радиационную защиту [5].

Риск возникновения рака в результате облучения плутонием

Широкомасштабное производство плутония имеет несколько технологических этапов, которые, как правило, подразделяются на три конкретных компонента: ядерные реакторы, радиохимический цикл и цикл производства плутония. Это означает, что воздействие плутония происходит преимущественно в производственных условиях, и работники радиохимических заводов и предприятий по его производству имеют наибольшую вероятность подвергнуться негативному воздействию. После ингаляционного поступления и осаждения в дыхательных путях плутоний выводится из лёгких путём переноса частиц в пищеварительный тракт и лимфатические узлы, а также через всасывание в кровь. Скорость клиренса в кровь зависит от химической формы вдыхаемого плутония. Например, при ингаляционном поступлении в виде нитрата плутоний всасывается в кровь с большей скоростью, чем в виде оксида. В действующей системе радиационной защиты оценка радиационного риска и вреда основана в первую очередь на рисках, наблюдаемых в когорте выживших после атомной бомбардировки 1945 г. жителей Японии, которые подверглись воздействию высокой мощности дозы, преимущественно гамма-излучения. Предполагается, что эти оценки риска можно применить и к другим ситуациям облучения, таким как внутреннее поступление альфа-излучающих радионуклидов, приводящее к пролонгированному и неравномерному облучению, с учётом значений относительной биологической эффективности альфа-частиц по сравнению с воздействием малых уровней гамма-излучения.

Эпидемиологические исследования, проведённые за последние два десятилетия и включающие сравнение с радоном, позволяют напрямую оценить риск возникновения рака при воздействии альфа-излучающих радионуклидов. Критический анализ этих результатов использован для оценки обоснованности допущений, применяемых для защиты от альфа-излучателей.

Эпидемиологические данные и результаты оценки рисков, связанных с воздействием плутония при поступлении его в организм, менее обширны по сравнению с исследованиями радона и его дочерних продуктов. Кроме того, оценка доз в результате облучения плутонием более сложна из-за химической природы его соединений и ретроспективной реконструкции доз на основе измерений биопроб. В России, Северной Америке и Европе воздействие плутония изучалось. Одно совместное исследование «случай — контроль» выполнено в Европе, но его масштаб был ограничен. Двумя основными объектами исследования являются когорты работников ядерных объектов ПО «Маяк» в Российской Федерации и Селлафилд в Великобритании. Оценки поступлений

Таблица 1 / Table 1

Характеристика сценариев облучения плутонием при общем поступлении 1 Бк ²³⁹Pu, а также при остром либо хроническом поступленииCharacteristics of plutonium exposure scenarios for a total intake of 1 Bq of ²³⁹Pu assuming either an acute intake or a chronic intake over 10 years

Поступление Intake	Вещество Substance	Возраст при поступлении, годы Age at intake, years	Длительность поступления, годы Intake duration, years	Скорость поступления, Бк/год Intake rate, Bq/year	Общее поступление, Бк Cumulated intake, Bq	Доза на лёгкие, мкГр (Публикация 141 (ППР, Часть 4))* Lung dose, µGy (Report 141 (OIR Part 4))*
Острое Acute	Оксид плутония Plutonium oxide	20	Случайное Incidental	Мгновенное Instantaneous	1	8.19
	Нитрат плутония Plutonium nitrate	20	Случайное Incidental	Мгновенное Instantaneous	1	1.22
Хроническое Chronic	Оксид плутония Plutonium oxide	20–29	10	0.1	1	7.85
	Нитрат плутония Plutonium nitrate	20–29	10	0.1	1	1.19

Примечание. * – поглощённая суммарная доза в лёгких, накопленная с возраста 20 лет до 89 лет (то есть более 70 лет), была рассчитана для нитрата плутония или оксида плутония на основе публикации 141 (ППР, часть 4; ICRP, 2019).

Note: * – The absorbed dose to the lung committed over 70 years (i.e., from ages 20 to 89 years) was calculated for plutonium nitrate or plutonium oxide based on Publication 141 (OIR Part 4; ICRP, 2019).

и доз, воздействующих на органы и ткани, у персонала ПО «Маяк» в результате ингаляционного поступления плутония основывались преимущественно на интерпретации измерений экскреции с мочой (с учётом трудового стажа работников и физико-химических форм вдыхаемых аэрозолей плутония).

Риск возникновения рака лёгких в результате воздействия плутония был количественно определён с широким диапазоном уровней воздействия в ходе масштабного обследования российских работников ПО «Маяк». Риски от воздействия более низких уровней плутония были дополнены анализом данных по другим когортам в Европе и Северной Америке. Одним из основных рисков, связанных с воздействием плутония, является рак лёгких. Для персонала ПО «Маяк» оценки риска возникновения рака лёгких сопоставимы с полученными в двух европейских исследованиях (2017 г.) результатами, имеющими относительно широкие доверительные интервалы.

Наряду с альтернативными дозиметрическими подходами нами рассматривалось влияние статистической мощности, неопределённости оценки дозы и сопутствующих факторов (курение и др.), которые могут повлиять на развитие рака. В настоящее время на основании эпидемиологических обследований сделаны оценки пожизненного избыточного риска возникновения рака лёгких у персонала, работающего с плутонием, в результате ингаляционного поступления.

Расчёты проводились для иллюстративных сценариев с суммарным поступлением плутония в 1 Бк, в предположении острого или хронического ингаляционного поступления в течение 10 лет, либо растворимого нитрата плутония, либо нерастворимого оксида плутония (табл. 1). Поглощённая доза в лёгких за 70 лет (то есть в возрасте от 20 до 89 лет) была рассчитана для нитрата плутония или оксида плутония на основе публикации 141 (OIR Part 4; ICRP, 2019).

Пожизненные риски были рассчитаны с использованием базовых показателей МКРЗ для мужского населения европейско-американского происхождения и модели риска, разработанной в результате анализа проекта Европейского союза SOLO. Такие сценарии однократного поступления рассматривались только в качестве примеров, чтобы дать оценку порядка величины риска и проиллюстрировать изменения дозы и риска для ингаляционного поступления плутония. Для одного и того же поступления кумулятивные дозы на ткани лёгких от оксида ²³⁹Pu выше доз от нитрата ²³⁹Pu, но пожизненный избыточный риск смертности от рака лёгких на мГр варьирует незначительно: по оценкам, от 1,4 до 1,7 на 10 тыс. человек, в зависимости от растворимости (нитрат или оксид плутония) и интенсивности воздействия (острое или хроническое поступление). При сравнении базовый пожизненный риск смертности от рака лёгких составляет 631 на 10 тыс. человек для популяции мужчин европейско-американского происхождения (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Пожизненный риск смертности от рака лёгких для сценариев с общим поступлением плутония в 1 Бк, при остром или хроническом поступлении нитрата плутония или оксида плутония, рассчитанный на основе публикации 141 (OIR, часть 4; ICRP, 2019) для расчёта дозы в лёгких и модели риска по Gillies и соавт. (2017)

Lifetime risk of lung cancer mortality for scenarios with a total plutonium intake of 1 Bq, assuming either acute intake or chronic intake, of either plutonium nitrate or plutonium oxide, calculated based on Publication 141 (OIR Part 4; ICRP, 2019) to calculate lung dose, and the risk model from Gillies et al. (2017)

Поступление Intake	Вещество Substance	Риск смерти от рака лёгких (смертей на 10 000) Risk of lung cancer death (deaths per 10,000)		
		базовый* / baseline*	избыточный / excess	избыточный на Гр / excess of Gy
Острое Acute	Оксид плутония / Plutonium oxide	631	0.012	1425
	Нитрат плутония / Plutonium nitrate	631	0.0021	1718
Хроническое Chronic	Оксид плутония / Plutonium oxide	631	0.011	1351
	Нитрат плутония / Plutonium nitrate	631	0.0020	1691

Примечание. * – мужчины европейско-американского происхождения (ICRP, 2007 г.).

Note: * – Euro-American males (ICRP, 2007).

Расчёты проведены на основе Публикации 141 (OIR Part 4; ICRP, 2019); для определения лёгочной дозы использована модель риска от Gillies и соавт. (2017). На основе исходного (базового) риска смерти от рака лёгких (смертей на 10 000) рассчитан избыточный риск смерти от рака лёгких (смертей на 10 000) и избыточный риск смерти от рака лёгких на Гр (смертей на 10 000) при остром потреблении оксида и нитрата плутония, а также хроническом потреблении оксида и нитрата плутония.

Сравнение пожизненного избыточного риска смертности от рака лёгких, обусловленного внешним гамма-излучением (на основе пожизненного обследования жителей Японии, выживших после атомной бомбардировки), и внутренним облучением альфа-частицами плутония (на основе исследования работников ПО «Маяк») показало, что при одной и той же поглощённой дозе на лёгкие риск, связанный с облучением альфа-частицами плутония, больше, чем риск, связанный с внешним гамма-облучением, примерно в 15–16 для модели избыточного относительного риска исследования продолжительности жизни и в 19–22 для модели избыточного абсолютного риска, используемых в зависимости от сценария воздействия. Несмотря на различное распределение дозы плутония и дочерних продуктов радона в лёгких, аналогичный расчёт воздействия дочерних продуктов радона дал коэффициенты, основанные на модели избыточного относительного риска, примерно от 14 до 15. Эти результаты предполагают, что биологическая эффективность альфа-частиц по отношению к фотонам высокой энергии составляет от 14 до 16 для рака лёгких.

Следует отметить, что подобное сравнение основывается на поглощённой дозе на лёгкие и пожизненном избыточном риске смертности от рака лёгких. Использован равный 2 фактор эффективности дозы и мощности дозы (DDREF) для риска, полученного из пожизненного обследования жертв атомной бомбардировки Японии. Отказ от применения DDREF приведёт к относительной биологической эффективности порядка 7–8 для рака лёгких. Кроме того, это сравнение эффектов облучения плутонием и внешнего гамма-облучения основано на пожизненном риске смертности от рака лёгких, а не на радиационном ущербе. Эти значения согласуются с действующим взвешивающим коэффициентом излучения (w_R), равным 20, для расчёта эквивалентных и эффективных доз в целях радиационной защиты. В то же время w_R является оценочной величиной для целей радиологической защиты и применяется ко всем стохастическим эффектам альфа-излучения, включая другие виды рака. В исследованиях, связанных с влиянием на печень и кости, наблюдались обусловленные воздействием плутония риски, к которым могут применяться разные значения относительной биологической эффективности для альфа-излучения.

Риск возникновения рака в результате облучения ураном

В настоящее время имеются очень слабые доказательств связи дозы внутреннего облучения, обусловленного воздействием урана, и риска возникновения онкологических заболеваний. Современные знания о рисках рака, связанных с воздействием урана (в отличие от ситуации с плутонием), не позволяют рассчитать пожизненный риск рака. В 2012 г. Международное агентство по изучению рака (IARC) пришло к выводу, что имеется достаточно доказательств канцерогенности урана в исследованиях с использованием экспериментальных животных, но эти данные ограничены в отношении людей, подвергшихся воздействию смесей природного, обогащённого и обеднённого урана (IARC, 2012). Недавно в отчёте за 2016 г. Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) (2017) представил обширный обзор, посвящённый биологическому действию урана в экспериментальных ис-

следованиях на лабораторных животных, а также в эпидемиологических исследованиях персонала и населения в целом. Доклад НКДАР ООН за 2016 г. (UNSCEAR, 2017) обновлён обзором недавно опубликованных эпидемиологических исследований риска развития рака в результате воздействия урана.

В большинстве исследований не использовались специфические для урана дозы облучения органов и тканей, полученные по результатам мониторинга, а облучение учитывалось с помощью экологических показателей и матриц профессионального облучения (или обозначался риск, связанный с внешним облучением). В нескольких исследованиях, опубликованных в последние годы, для конкретных органов и тканей использовались усовершенствованные методы расчёта дозы от урана. Однако они остаются неубедительными в связи с ограниченной статистической мощностью или отсутствием регистрации в прошлом некоторой информации, необходимой для реконструкции доз.

Относительно быстрое выведение из кровотока, различия в методах контроля внутреннего облучения и вариабельность воздействия соединений урана усложняют дозиметрию работников, участвующих в операциях по его обогащению и переработке. Растворимость соединений урана, воздействию которых подвергается персонал, является особенно важным параметром при определении доз, получаемых лёгкими, по данным биопроб.

Таким образом, информации из доступных в настоящее время эпидемиологических исследований недостаточно для того, чтобы надёжно оценить связь «доза – эффект» между воздействием урана и возникновением раковой опухоли какой бы то ни было локализации.

В Публикации 150 представлен критический обзор Доклада НКДАР ООН за 2016 г. (2017 г.) и обсуждаются недавние эпидемиологические исследования. В отличие от Доклада НКДАР ООН за 2016 г. (2017 г.) в данной публикации основное внимание уделяется обследованиям персонала, участвующего в работах по обращению с ураном (при его доминирующем воздействии), что исключает обследования шахтёров, занимающихся добычей урана, которые в первую очередь подвергаются воздействию радона и его продуктов.

Вероятность внутреннего облучения в результате профессионального внутреннего поступления урана варьируется на протяжении всего ядерного топливного цикла и зависит от процессов, используемых методов и химических характеристик облучения ураном. На этапах ядерного топливного цикла возникает разная опасность для здоровья по причине различий форм урана, присутствующих на каждой стадии. Оценка доз от воздействия урана для работников, занятых в ядерно-топливном цикле, затруднена из-за относительно быстрого выведения урана из кровотока, изменчивости воздействия соединений урана и различий в методах, используемых для контроля внутреннего облучения.

В будущем изучение риска рака лёгких должно быть сосредоточено на рабочих, подвергшихся воздействию нерастворимого оксида урана, поскольку эти работники получают самые высокие дозы облучения лёгких. Следует также учитывать наличие привычки курения, если такая информация имеется.

Внутреннее поступление оценивалось нами по данным биопроб, либо с помощью метода наименьших квадратов, либо методом Байеса. Неопределённости биокинетических моделей, дозовые коэффициенты и данные биопроб количественно определялись с помощью логнормальных распределений вероятности на базе литературных и экспертных оценок и распространялись методом Монте-Карло.

Эпидемиологические исследования онкологического риска, связанного с облучением ураном, охватывают преимущественно когорты работников, подвергавшихся воздействию различных химических форм урана. Опубликованные данные исследований сопоставляются и оцениваются,

но они, как правило, не дают информации, необходимой для оценки рисков, характерных для воздействия урана.

В последние годы было опубликовано несколько исследований с использованием усовершенствованных методов расчёта дозы на конкретные органы и ткани, однако они остаются неубедительными в силу ограниченной статистической мощности, а также из-за отсутствия регистрации в прошлом некоторой информации, необходимой для реконструкции доз. Таким образом, в настоящее время на основе опубликованных данных невозможно количественно оценить риск возникновения рака по дозам от урана на отдельные органы и ткани. Эпидемиологические обследования рабочих урановых производств не дают убедительных доказательств повышенного риска рака, который может быть связан с воздействием урана. Даже исследования рака лёгких после ингаляционного поступления нерастворимых соединений урана, которые приводят к самым высоким дозам на лёгкие, не дают убедительных доказательств, а результаты изучения других локализаций рака не дают последовательной картины. В будущем при проведении анализа необходимо различать химические формы соединений урана. Ожидается, что со временем объединённые анализы предоставят дополнительную информацию о потенциальных рисках, связанных с воздействием данного элемента на организм.

Заключение

Публикация МКРЗ 150, посвящённая оценке исследований риска развития рака после воздействия альфа-излучающих изотопов плутония и урана, представляет собой второй всесторонний обзор рисков для здоровья, связанных с воздействием плутония и урана, за более чем тридцатилетний период. Первый подобный обзор был выполнен МКРЗ в отношении изучения риска рака лёгких за счёт облучения радоном и продуктами его распада, чему посвящена публикация МКРЗ 115 [6].

Эпидемиологические данные о рисках, связанных с воздействием плутония, менее обширны по сравнению с радоном и продуктами его распада. Количество исследований, дающих надёжные данные о рисках, связанных с плутонием, невелико (преимущественно обследования когорты рабочих ПО «Маяк» и Селлафилд). Оценка доз, связанных с облучением плутонием, осложняется химической природой его соединений, которая играет важную роль в определении растворимости в лёгких и создаёт трудности при восстановлении доз в лёгких на основе измерений концентраций плутония в моче или фекалиях с помощью биоанализа.

Риск возникновения рака, связанный с воздействием плутония, изучался в ходе обследований российских, американских и европейских рабочих. Две самые информативные когорты персонала, работающего с плутонием, — это работники ПО «Маяк» в Российской Федерации и завода в Селлафилде в Великобритании. Оценки поступления и полученных в результате доз, воздействующих на органы и ткани персонала при ингаляционном поступлении плутония, главным образом ^{239}Pu , были основаны преимущественно на интерпретации индивидуальных данных биоанализа мочи (с учётом профессионального стажа рабочих и физико-химических форм вдыхаемых аэрозолей плутония). Биокинетические и дозиметрические модели постоянно совершенствуются в течение последних 20 лет, но в оцениваемых дозах остаются значительные неопределённости.

Были проведены расчёты пожизненного избыточного риска смертности от рака лёгких, связанного с поглощённой дозой на лёгкие, на основе сценариев ингаляционного воздействия при суммарном поступлении плутония 1 Бк. Предполагалось острое или хроническое поступление растворимого нитрата плутония либо его нерастворимого оксида. Эти сценарии однократного поступления следует рассматривать

в качестве примеров, чтобы определить порядок величины риска и показать вариации дозы и риска однократного поступления. Сравнение пожизненного избыточного риска смертности от рака лёгких в связи с воздействием внешнего источника гамма-излучения (на основании пожизненного обследования жертв атомной бомбардировки Японии) и с внутренним облучением плутонием (на базе обследования персонала ПО «Маяк») показывает, что риски, связанные с воздействием плутония, приблизительно в 16 раз выше рисков, связанных с внешним гамма-облучением, при одной и той же поглощённой дозе на лёгкие и одинаковом распределении дозы. Такие сравнения предполагают биологическую эффективность альфа-частиц по сравнению с фотонами высокой энергии порядка 14–16 для рака лёгких. Эти значения согласуются с действующим взвешивающим коэффициентом излучения (w_R), равным 20, который используется МКРЗ в радиологической защите в отношении альфа-частиц при расчёте эквивалентных и эффективных доз (ICRP, 2007). Тем не менее следует отметить, что такое сравнение основано на поглощённой дозе на лёгкие и пожизненном избыточном риске смертности от рака лёгких, при условии применения DDREF, равного 2, к риску, полученному из японского пожизненного обследования. Неприменение DDREF привело бы к относительной биологической эффективности примерно от 7 до 8.

Ситуация в отношении рисков, связанных с ураном, сложнее, поскольку информация, доступная в настоящее время на базе эпидемиологических исследований, недостаточна для обеспечения надёжной оценки риска, особенно из-за ограничений в реконструкции воздействия. Необходимы дальнейшие исследования с более совершенной внутренней дозиметрией.

Неопределённости, связанные с облучением ураном и плутонием и реконструкцией дозы, важны, поскольку различные химические формы могут формировать разные кумулятивные поглощённые дозы на конкретные органы и ткани. В последние годы были приняты согласованные усилия для улучшения оценки дозы на конкретные органы и ткани и для выявления потенциального влияния неопределённости на оценки риска. В будущем рекомендуется продолжать исследования в этих направлениях наряду с разработкой усовершенствованных подходов к дозиметрии, поскольку радиоизотопы урана и плутония по-прежнему остаются существенным фактором, оказывающим влияние на здоровье некоторых категорий работников атомной промышленности.

Необходимы дальнейшие исследования в области эпидемиологии, дозиметрии и моделирования риска, направленные на улучшение оценки рисков для здоровья, обусловленных воздействием плутония или урана. Неопределённости, связанные с воздействием урана и плутония и реконструкцией дозы, значительны, а ингаляционное поступление различных химических форм определяет значительные различия в кумулятивных поглощённых дозах на конкретные органы и ткани.

В последние годы была проведена серьёзная работа, направленная на улучшение оценки доз и рассмотрение потенциального влияния неопределённостей на оценки риска. Работу в этом направлении следует продолжать. Кроме того, необходимо расширение существующих когорт и проведение комплексного анализа данных для увеличения мощности и более точной оценки рисков, связанных с облучением плутонием и ураном. Что касается урана, в будущих исследованиях необходимо учитывать влияние различных химических форм соединений урана. Это позволит лучше охарактеризовать риски с точки зрения возникновения рака не только в лёгких, но и в других органах и тканях.

С развитием технологий производства новых видов ядерного топлива можно ожидать появления расширенных подходов к оценке риска соединений урана и плутония.

Литература

1. Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В., Рачков В.И., Хомяков Ю.С. Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных нуклидов в ЯТЦ – эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ. *Известия академии наук. Энергетика*. 2015; (6): 15–25.
2. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П. и др. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 1: Методы и результаты. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021; 66(5): 23–32. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-5-23-32>
3. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П. и др. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 2: Дозы и риски. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2022; 67(1): 39–45. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45>
4. Паринов О.В., Лягинская А.М., Шандала Н.К., Метляев Е.Г., Купцов В.В. Проблемы оценки состояния здоровья персонала, работающего в условиях новых технологий производства ядерного топлива. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2021; 66(3): 9–12. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-3-9-12>
5. ICRP Publication. Cancer risk from exposure to plutonium and uranium. *Ann. ICRP*. 2020; 50(4): 150.
6. Жуковский М.В., Киселев С.М., Губин А.Т., ред. *Риск возникновения рака лёгкого при облучении радоном и продуктами его распада*. М.; 2013.

References

1. Adamov E.O., Vlaskin G.N., Lopatkin A.V., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S. Radiation equivalent treatment of radioactive nuclides in nuclear fuel cycle – effective alternative to the delayed solution of spent nuclear fuel accumulation problem. *Izvestiya akademii nauk. Energetika*. 2015; (6): 15–25. (in Russian)
 2. Il'in L.A., Samoylov A.S., Tsov'yanov A.G., Shinkarev S.M., Shandala N.K., Gantsovskiy P.P., et al. Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC Schc. Part 1: Methods and Results. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2021; 66(5): 23–32. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-5-23-32> (in Russian)
 3. Il'in L.A., Samoylov A.S., Tsov'yanov A.G., Shinkarev S.M., Shandala N.K., Gantsovskiy P.P., et al. Radiation-Hygienic Investigations of Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC Schc. Part 2: Doses and Risks. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2022; 67(1): 39–45. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45> (in Russian)
 4. Parinov O.V., Lyaginskaya A.M., Shandala N.K., Metlyaev E.G., Kuptsov V.V. Problems of assessing the health status of personnel working in conditions of new technologies for nuclear fuel production. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2021; 66(3): 9–12. <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2021-66-3-9-12> (in Russian)
 5. ICRP Publication. Cancer risk from exposure to plutonium and uranium. *Ann. ICRP*. 2020; 50(4): 150.
 6. Zhukovskiy M.V., Kiselev S.M., Gubin A.T., eds. *Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon [Risk vznikeniya raka legkogo pri obluchenii radonom i produktami ego raspada]*. Moscow; 2013. (in Russian)
-