

М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, А.В. Симаков,
Г.П. Фролов, В.Н. Клочков, Ю.В. Абрамов, И.К. Теснов

МЕДИКО-САНИТАРНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОТРАБОТАННЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

Контактное лицо: Юрий Анатольевич Саленко, e-mail: salenkoua@gmail.com

РЕФЕРАТ

Цель: Рассмотреть особенности формирования возможных медико-санитарных последствий для персонала и населения в случае радиационных аварий (РА) на объектах послереакторного обращения с отработанным ядерным топливом (ОЯТ), включая бассейны выдержки (БВ) и общестанционные хранилища атомных электростанций (АЭС), транспортирование ядерных материалов и последующую их переработку на радиохимических заводах.

Результаты: На основе анализа опубликованных материалов систематизированы возможные радиационные последствия для персонала и населения в случае различных типов РА на этапах обращения с ОЯТ.

Заключение: Современные технологии, лежащие в основе замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) обеспечивают высокий уровень радиационной безопасности персонала и населения. В то же время большое количество накопленных радиоактивных и ядерных материалов, находящихся в обращении, обуславливают необходимость поддержания в готовности систему медико-санитарного обеспечения при РА на всех этапах обращения с ОЯТ. Медико-санитарные последствия для персонала могут быть связаны с облучением в результате самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР) и внутренним поступлением продуктов деления (ПД) урана и актинидов (ингаляционным путем и через раневые поверхности).

При авариях на радиохимическом производстве также возможны комбинированные радиационно-термические и радиационно-химические поражения. Основная потенциальная опасность для населения в случае РА на хранилище ОЯТ заключается в загрязнении территории и облучении долгоживущими ПД урана и актинидами. Это требует уточнения и разработки соответствующих критериев и производных уровней вмешательства для принятия решений по защитным мерам.

Гипотетически медико-санитарные последствия в случае РА со свежим ОЯТ могут быть сопоставимы с масштабной реакторной аварией и потребуют проведения срочных защитных мер, включая эвакуацию населения и йодную профилактику. Важным фактором, который также нужно учитывать при планировании медико-санитарных мероприятий, является необходимость проведения санитарной обработки пострадавших.

Ключевые слова: *отработанное ядерное топливо, радиационная авария, медико-санитарные последствия*

Для цитирования: Грачев М.И., Саленко Ю.А., Симаков А.В., Фролов Г.П., Клочков В.Н., Абрамов Ю.В., Теснов И.К. Медико-санитарные последствия радиационных аварий при обращении с отработанным ядерным топливом // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 3. С. 13–20. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-3-13-20

DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-3-13-20

M.I. Grachev, Yu.A. Salenko, A.V. Simakov,
G.P. Frolov, V.N. Klochkov, Yu.V. Abramov, I.K. Tesnov

Health Effects in Case of Radiation Accidents When Managing Spent Nuclear Fuel

A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia

Contact person: Yu.A. Salenko, e-mail: salenkoua@gmail.com

ABSTRACT

Purpose: To consider the features of potential health effects for personnel and for the population in the event of radiation accidents at facilities for post-reactor spent nuclear fuel management (including spent nuclear fuel pools and general plant storage facilities, transportation of nuclear materials and their subsequent processing at radiochemical plants).

Results: Based on the analysis of publications, the potential radiation consequences for personnel and for the population in the event of various types of radiation accidents at the stages of spent nuclear fuel management were systematized.

Conclusion: Advanced technologies underlying the closed nuclear fuel cycle provide a high level of radiation safety for personnel and for the population. At the same time, a large amount of accumulated radioactive and nuclear materials makes it necessary to maintain the health care system in preparedness at all stages of spent nuclear fuel management. Health effects for personnel may be associated with exposure because of criticality accident and internal intake of fission products of uranium and actinides (by inhalation and through wound surfaces).

In case of accidents at radiochemical production, combined radiation-thermal and radiation-chemical injuries are also possible. The main potential hazard for the population in the event of radiation accident at the spent nuclear fuel storage facility is the contamination of the environment and exposure to long-lived uranium fission products and actinides. This requires clarification and development of appropriate criteria and derived intervention levels for making decisions on protective measures.

Hypothetically, the health effects in case of radiation accident when managing “fresh” spent nuclear fuel can be comparable to a large-scale reactor accident and require urgent protective measures, including evacuation and iodine prophylaxis. An important factor that should also be taken into account when planning health care measures is the need for decontamination of victims.

Keywords: spent nuclear fuel, radiation accident, health effects

For citation: Grachev MI, Salenko YuA, Simakov AV, Frolov GP, Klochkov VN, Abramov YuV, Tesnov IK. Health Effects in Case of Radiation Accidents When Managing Spent Nuclear Fuel. Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67(3):13–20. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-3-13-20

Введение

Созданные в России инфраструктура и технологии получения и переработки ядерных материалов явились основой для формирования современной стратегии замкнутого ЯТЦ. Переработка ОЯТ¹ позволяет существенно снизить и в дальнейшем полностью решить проблему большой наполненности отработавшими тепловыделяющими сборками (ОТВС) БВ и объектовых общестанционных хранилищ атомных электростанций (АЭС) [1–3].

Становление и отработка технологий извлечения плутония в середине прошлого века сопровождалась случаями сверхнормативного облучения персонала, многочисленными радиационными инцидентами, а в отдельных случаях – масштабными РА, приведшими к значимым радиационным последствиям для населения и радиоактивному загрязнению обширных территорий и водных систем [4–10].

Современные научно-технические решения и системы глубокоэшелонированной защиты, лежащие в основе эксплуатации объектов замкнутого ЯТЦ, обеспечивают высокий уровень радиационной безопасности персонала и населения. В целом, практика обращения с ОЯТ строится на обеспечении подкритичности ядерных материалов в течение всего времени их хранения, транспортирования и переработки, предотвращения физического повреждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов).

Международные и отечественные концепции противоаварийного планирования и обеспечения готовности не исключают медико-санитарные последствия для персонала и населения в результате РА на объектах инфраструктуры ЯТЦ.

Цель работы – рассмотреть особенности формирования возможных медико-санитарных последствий для персонала и населения в случае РА на объектах после реакторного обращения с ОЯТ, включая БВ и общестанционные хранилища АЭС, транспортирование ядерных материалов и последующую их переработку на радиохимических заводах.

В настоящей статье на основе анализа исторического опыта и опубликованных материалов систематизированы возможные радиационные последствия для персонала и населения в случае различных типов РА на этапах обращения с ОЯТ. Предполагается, что затронутые в статье вопросы после дальнейшего уточнения соответствующих дозиметрических критериев лягут в основу разработки производных уровней вмешательства для принятия решений по медицинскому вмешательству и защитным мерам.

Приреакторные хранилища

Хранение ОЯТ в БВ или общестанционных хранилищах является промежуточной стадией топливного

цикла, обеспечивающей снижение уровня активности² и остаточное тепловыделение ОТВС перед их транспортированием на переработку.

Ситуация, когда значительная часть ОЯТ располагается на площадках АЭС, будет сохраняться в течение ближайших лет³. Оценка угроз и последствий РА в БВ и общестанционных хранилищах связана с консервативными предположениями маловероятных исходных событий. Так, МАГАТЭ относит БВ, в которых хранится недавно выгруженное топливо (1–2 мес.), суммарной активностью $\geq 0,1$ ЭБк (10^{17} Бк) по ^{137}Cs , к первой (самой высокой) категории радиационных угроз [11]. Проведенные расчеты показывают, что детерминированные эффекты у населения возможны в случае аварии, связанной с полной потерей охлаждения ТВЭЛов в БВ и экзотермической реакцией $\text{Zr} + \text{H}_2\text{O}$ с последующим взрывом и выбросом в атмосферу радиоактивного материала.

Резервирование источников подпитки БВ, а также наличие разработанных процедур по управлению аварией предотвращают оголение ОЯТ и возникновение РА по данному сценарию⁴. Кроме того, временные параметры достижения критических температур ОЯТ в результате потери охлаждения в течение нескольких суток, позволяют своевременно провести необходимые защитные мероприятия в отношении населения без превышения доз облучения в диапазоне рекомендуемых референсных значений [12, 13].

Во время аварии на АЭС Фукусима (март 2011 г.) пристанционные БВ и хранилища ОЯТ в целом сохранили свои защитные функции. Переток воды из бассейна перегрузки в БВ был ключевым фактором предотвращения повреждения топлива на блоке 4 [9].

В табл. 1 представлены возможные медико-санитарные последствия в случае РА в БВ или общестанцион-

² Активность ОЯТ зависит от различных параметров: типа реактора; используемого топливного цикла и состава свежего топлива; глубины выгорания; мощности, на которой работал реактор перед остановкой.

Так же как и другие характеристики ОЯТ, активность существенно зависит от времени выдержки. В течение первых суток и месяцев после остановки реактора активность практически полностью определяется β -распадами короткоживущих продуктов деления (ПД), которые вносят определяющий вклад в энерговыделение и γ -фон от ОТВС. При выдержке ОЯТ более 10 лет основным γ -излучателем становится $^{137\text{m}}\text{Ba}$ в результате распада ^{137}Cs . Активность приблизительно спадает за 10 суток в 10 раз, за 1 год – в 100 раз, а за 30 лет – в 1000 раз. Спад активности, в основном, связан с распадом короткоживущих β -активных изотопов. Активность α -активных изотопов за 30 лет спадает в 6–7 раз. В связи с этим оправдано разделение ОЯТ на ПД, уран, плутоний и минорные актиниды для последующего раздельного захоронения и (или) последующего использования.

³ По различным оценкам, в мире к настоящему времени накоплено более 200–350 тыс. тонн ОЯТ. Ожидаемое количество ОЯТ в России на АЭС и в централизованных хранилищах составляет более 20 тыс. тонн. Ежегодный прирост количества ОЯТ составляет в России около 1 тыс. тонн и в мире 11–12 тыс. тонн. Данные о количестве ОЯТ на площадках российских АЭС содержатся в [1].

⁴ Осипов А.М. Моделирование аварийных процессов с нарушением теплоотвода в хранилище отработавшего ядерного топлива РБМК: автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 2020. 43 с.

Таблица 1

Медико-санитарные последствия РА на приреакторных БВ ОЯТ
Health effects of radiation accidents at near-reactor spent nuclear fuel pools

Исходное событие и нарушение барьеров безопасности	Условия формирования выброса и радиационной обстановки	Факторы облучения персонала	Факторы облучения населения
Нарушение охлаждения ОТВС. Возникновение экзотермической реакции $Zr+H_2O$. Взрыв. Пожар	В результате высоких температур возможен подъем облака выброса на высоту нескольких сотен метров	Доза внешнего γ -, β -облучения, может быть на уровне порогов детерминированных эффектов. Возможно сильное загрязнение кожных покровов, поверхностей оборудования и помещений радиоактивными веществами, ингаляционное поступление в организм радиоактивных изотопов йода и долгоживущих ПД. Необходимо учитывать вероятность комбинированных и сочетанных поражений, включая термические ожоги	Внешнее облучение от облака выброса и в результате радиоактивных выпадений. Возможно ингаляционное поступление радиоактивных изотопов йода (для свежевыгруженного топлива) и долгоживущих ПД. В зависимости от масштаба РА может потребоваться проведение неотложных и срочных защитных мер
Нарушение охлаждения ОТВС. Нарушение герметичности оболочек ТВЭЛОВ	Выброс парогазовой смеси в помещения и в атмосферу	Вероятны высокие значения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) γ -излучения в помещениях БВ от оголенных и разрушенных ТВЭЛОВ и в результате загрязнения радиоактивными веществами поверхностей и оборудования	Внешнее γ -, β -облучение в результате выпадений. Дозы от ингаляционного поступления в организм радиоактивных изотопов йода (для свежевыгруженного топлива), скорее всего, не будут достигать критериев для проведения йодной профилактики
Ошибка или неисправность, приводящая к падению чехлов ОТВС на дно БВ и их разгерметизации. Образование критической массы и возникновение СЦР	На дозу γ -, n -облучения влияет толщина слоя воды в БВ. Образование и выброс облака парогазовой смеси в помещения и в атмосферу	Доза внешнего γ - n -облучения оператора, находящегося на расстоянии нескольких метров от места СЦР, может быть на уровне порогов детерминированных эффектов. Необходимо учитывать дозу внешнего γ -, β - облучения в результате загрязнения поверхностей и оборудования	Последствия аварии, скорее всего, будут ограничены территорией промплощадки

ном хранилище ОЯТ. Кроме сценария газо-аэрозольного выброса рассмотрен сценарий с возникновением условий для критичности и последующей СЦР, связанной с падением тепловыделяющей сборки, ее разрушением и образованием критической массы. Можно предположить, что при РА в БВ в отличие от аварийной ситуации, связанной с плавлением активной зоны реакторной установки, в составе газо-аэрозольного выброса имеется относительно большая доля крупнодисперсных аэрозолей. Поэтому значимая доза внешнего и внутреннего облучения будет сформирована на ограниченных расстояниях в пределах промплощадки и санитарно-защитной зоны.

Предварительные оценки свидетельствуют, что при указанных типах РА, даже при обращении со свежевыгруженным топливом (до 2–3 мес.), противоаварийное планирование не требует дополнительных мероприятий к существующим планам по защите персонала и населения в случае реакторной аварии на АЭС. При планировании медико-санитарного обеспечения следует учитывать вероятность высоких уровней загрязнения радиоактивными веществами кожных покровов и внутреннего (ингаляционного) поступления долгоживущих ПД урана и актинидов.

Транспортирование ОЯТ

Транспортные РА, включая события с различными радионуклидными источниками, радиофармпрепаратами и др., являются относительно частыми событиями, как правило, не приводящими к значимым радиационным последствиям. При этом следует подчеркнуть, что за все время транспортирования ОЯТ в России не было отмечено ни одного ядерного или радиационного происшествия⁵. Тем не менее, мировой опыт свидетельствует о возможности транспортных РА с ядерными материалами. Так, например, известны аварийные ситуации крушения бомбардировщиков с перевозимым ядерным оружием на

борту (1966 г., Паломарес, Испания, бомбардировщик В-52⁶; 1968 г., Туле, Гренландия, бомбардировщик В-92⁷) [14]. Конечно, приведенные ситуации не имеют какого-либо отношения к вопросу оценки надежности транспортно-упаковочного комплекта (ТУК), но в определенной степени должны учитываться при планировании перевозки ОЯТ⁸ авиационным транспортом [15].

В общем смысле при подготовке планов аварийного реагирования следует обратить внимание на возможные причины повреждений упаковок, которые могут причинить вред здоровью людей и/или окружающей среде. Аварии с потенциально высокой опасностью, в основном, связаны только с упаковками типа В и С, так как другие упаковки содержат радиоактивный материал в форме или в количестве, которые не представляют радиационной опасности [16, 17]. Современные правила транспортирования ОЯТ, требования к конструкции ТУК и технические решения, основанные на программе испытаний, полностью исключают радиационные последствия для персонала и населения в случае аварии при транспортировании ТУК. В то же время, отечественные и международные нормативные документы и рекомендации требуют противоаварийного планирования и поддержания в готовности отраслевых и федеральных структур, ответственных за решение вопросов аварийного реагирования, в том числе в случае террористических актов [18]. Отсутствие сценариев, в которых могут

⁶ Столкновение во время дозаправки топливом. Авария затронула 4 единицы ядерного оружия: 2 единицы остались неповрежденными, 2 – разрушились при падении на землю. В результате возникло радиоактивное загрязнение местности плутонием.

⁷ В результате авиакатастрофы 4 единицы ядерного оружия были разрушены, возникло радиоактивное загрязнение местности и морской среды плутонием.

⁸ В 1993–1994 гг. состоялись две перевозки ОЯТ исследовательского реактора ИРТ-5000 из Ирака (Tuwaittha Nuclear Research Centre – TNRC) в Россию (ПО «Маяк»). Всего было вывезено 208 ОТВС, содержащих чуть менее 100 кг урана, в том числе и высокообогащенного. Вывоз осуществлялся в американских контейнерах NAC-LWT (NAC International) на российском воздушном судне АН-124-100.

⁵ Райков С.В., Бучельников А.Е., Ершов В.Н., Нащокин В.В. 70 лет атомной отрасли – 70 лет безопасных перевозок радиоактивных материалов; <https://www.atomic-energy.ru/articles/2015/11/18/61272>.

Таблица 2

Медико-санитарные последствия РА на радиохимическом производстве
Health effects of radiation accidents at radiochemical production

Исходное событие и нарушение барьеров безопасности	Условия формирования выброса и радиационной обстановки	Факторы облучения персонала	Факторы облучения населения
Нарушение регламента работ. Непредвиденные технические нарушения и поломки	Образование условий для создания критической массы и возникновения СЦР. Возможен осциллирующий характер СЦР	Возможны дозы внешнего γ -, n - облучения выше порогов детерминированных эффектов, ингаляционное поступление в организм радиоактивных изотопов йода и других ПД	При критичности на уровне $\geq 1 \cdot 10^{18}$ делений суммарная доза облучения населения не будет превышать критериев для проведения неотложных и срочных защитных мер*
Нарушения и неисправности при выполнении операций по растворению и выделению радиоактивных материалов, приводящие к разогреву и взрывному газовыделению	Выброс газов и облака радиоактивных аэрозолей в помещения и в атмосферу	Высокие уровни загрязнения помещений и оборудования α -, γ -, β -излучающими радионуклидами. Возможно ингаляционное поступление в организм изотопов плутония и урана. Необходимо учитывать вероятность комбинированных и сочетанных поражений, включая химические и термические ожоги	Внешнее γ -, β -облучение в результате выпадений ПД. Необходимо учитывать ингаляционное поступление в организм долгоживущих радионуклидов и актинидов. В зависимости от масштаба РА может потребоваться проведение неотложных и срочных защитных мер
Протечки и выход радиоактивных веществ в воздух производственных помещений в результате коррозии трубопроводов и арматуры, неисправности в работе систем вентиляции и вытяжных систем. Ошибочные действия персонала по обслуживанию оборудования	В ряде случаев радиоактивное загрязнение воздуха, поверхностей и оборудования производственных помещений будет выше установленных нормативных значений	Наибольшую опасность и сложность в оценке представляет внутреннее облучение в результате ингаляции актинидов и долгоживущих ПД	Выход радиоактивных веществ на поверхность из наблюдательных скважин в местах прокладки трубопроводов или хранилищ жидких РАО. При этом радиоактивное загрязнение имеет локальный характер (территория предприятия)

Примечание. * Проведенные оценки на основе консервативных допущений показывают, что даже в случае СЦР с числом делений 10^{20} доза облучения щитовидной железы не будет превышать нескольких мЗв на расстоянии до 1 км от источника выброса.

быть оценены медико-санитарные последствия повреждения ТУК даже при крайне маловероятных исходных событиях, является основанием для рассмотрения радиационного фактора как менее значимого, по сравнению, например, с тяжестью возможных механических травм или термических ожогов у персонала в результате транспортно-аварийной аварии.

Основные действия сопровождающего груз персонала в случае РА при транспортировании ОЯТ закреплены в аварийной карточке. Требования к планированию и обеспечению готовности к ликвидации последствий транспортных аварий установлены федеральными нормами и правилами [19]. Медицинское обеспечение мероприятий (работ) по ликвидации последствий РА включает эвакуацию пострадавших из зоны РА в лечебные учреждения.

Радиохимическое производство

В соответствии с нормативными документами радиохимические производства оцениваются как имеющие высокую потенциальную опасность. Многообразие технологических операций радиохимической переработки ядерных материалов требует проведения оценок последствий возможных РА на конкретном участке производства и в конкретных условиях его размещения [20].

В результате аварийного выброса на радиохимическом заводе Сибирского химического комбината в апреле 1993 г.⁹ радиоактивному загрязнению подверглись производственные помещения, промышленная площадка и территория в северо-восточном направлении [21]. Облучение персонала (включая кожные покровы) было обусловлено внешним γ -, β -излучением ^{95}Nb , ^{95}Zr , $^{103, 106}\text{Ru}$, ^{125}Sb , $^{141, 144}\text{Ce}$. Максимальные индивидуальные

⁹ В результате грубого нарушения оператором технологического регламента (PUREX – процесс) произошла автокаталитическая реакция с последующим повышением давления и объемным взрывом паров оксида азота. При взрыве значительная часть плутония и других радиоактивных веществ была выброшена в атмосферу. Суммарная активность выброса γ -, β -излучающих нуклидов была оценена в 1,5 ТБк; активность выброшенного ^{239}Pu – около 6 ГБк.

дозы не превысили 25–50 мЗв. Вклад в эффективную дозу внутреннего облучения (в том числе за счет ингаляции ^{239}Pu) был оценен на уровне 3–5 %. Индивидуальные дозы облучения жителей д. Георгиевка не превысили 0,1 мЗв и, соответственно, не потребовали защитных мер. По нашим оценкам, масштаб аварии по международной шкале INES не превысил события 3-го уровня, что в последствии было подтверждено другими экспертами [4].

Для своевременного обнаружения последствий нарушений в работе и инцидентов необходимо совершенствовать систему радиационного контроля, включая проведение постоянного мониторинга загрязнения воздуха рабочих помещений, в том числе ^{241}Am .

Характеристики возможных РА, путей и факторов облучения персонала и населения на радиохимическом производстве представлены в табл. 2. Относительно реалистичными являются радиационные инциденты, связанные с нарушениями регламента текущих производственных операций и несоблюдением требований радиационной безопасности.

Предотвращение СЦР остается основным элементом обеспечения ядерной безопасности на радиохимическом производстве. Подавляющее число аварий с возникновением СЦР произошло при обращении с растворами и пульпами ядерных материалов [5, 6]. Главными причинами являлись нарушения требований по использованию оборудования в ядерно-безопасной геометрии, ошибки персонала, недостатки в учете и контроле ядерных материалов при их передачах и подготовке к загрузке в технологические устройства. Растянутый по времени и постепенно затухающий характер СЦР в растворах позволяет осуществить внешнее вмешательство для прекращения СЦР и перевода системы в подкритическое состояние. Наибольшую опасность представляют обогащенный уран и плутоний, а по агрегатному состоянию – их водные растворы или водородсодержащие смеси.

Централизованные хранилища и пункты захоронения радиоактивных отходов

Переработка и централизованное хранение ОЯТ осуществляется на двух предприятиях Госкорпорации

Таблица 3

Предполагаемые последствия РА при обращении и хранении РАО
Estimated consequences of radiation accidents during the managing and storage of radioactive waste

Исходное событие и нарушение барьеров безопасности	Условия формирования выброса и радиационной обстановки	Факторы облучения персонала	Факторы облучения населения
Поломки оборудования при подготовке и перемещении упаковки (пенала) в пункты захоронения РАО. Нарушение целостности матрицы, выход ядерных материалов за пределы барьеров, попадание воды в хранилище, образование гетерогенной критической массы с последующим возникновением СЦР. Нарушение целостности упаковки (пенала) в результате падения	Значительное энерговыделение. Разрушение конструкций хранилища. Радиоактивное загрязнение поверхностей и оборудования. Выброс ПД за пределы хранилища в атмосферный воздух	Возможны дозы внешнего γ -, n - облучения выше порогов детерминированных эффектов. Ингаляционное поступление в организм радиоактивных изотопов йода и других ПД	Доза внешнего облучения, скорее всего, не будет превышать критериев для проведения неотложных и срочных защитных мер
	Радиоактивное загрязнение в месте падения упаковки	Локальное радиоактивное загрязнение, не выходящее за территорию предприятия	
Нарушения и неисправности в системе охлаждения хранилища жидких высокоактивных отходов	Выброс газов и облака радиоактивных аэрозолей в помещения и далее через систему вентиляции в атмосферу	Высокие уровни загрязнения помещений и оборудования α -, γ - и β -излучающими радионуклидами. Ингаляционное поступление в организм ПД, включая изотопы плутония и урана. Необходимо учитывать возможность комбинированных и сочетанных поражений, включая химические и термические ожоги	Внешнее γ -, β -облучение в результате выпадений. Ингаляционное поступление в организм радиоактивных аэрозолей в результате вторичного ветрового подъема. Радиоактивное загрязнение местных сельскохозяйственных продуктов и источников питьевого водоснабжения. Формирование со временем передачи радионуклидов по наземным и водным пищевым цепочкам
Нарушение целостности стенок хранилища в результате коррозии. Протечки и выход радиоактивных веществ в подстилающие породы подземные воды	Неконтролируемое радиоактивное загрязнение прилегающей территории и подземных вод	При проведении аварийных и ремонтных работ облучение персонала в пределах регламентируемых значений доз	Радиоактивное загрязнение местных сельскохозяйственных продуктов и источников питьевого водоснабжения. Формирование со временем передачи радионуклидов по наземным и водным пищевым цепочкам

«Росатом» – ФГУП «ПО «Маяк» («мокрое» хранение и промышленная переработка всех видов ОЯТ) и ФГУП «Горно-химический комбинат» (централизованное «мокрое» и «сухое» хранение. Проектные сроки хранения ОЯТ в указанных хранилищах составляют более 50 лет. С учетом физических характеристик ОЯТ значимые последствия РА на данных типах высокотехнологичных и безопасных хранилищ возможны только при их разрушении.

В процессе переработки ОЯТ образуются различные по составу и агрегатному состоянию жидкие радиоактивные отходы, не рассматриваемые в качестве полезного материала для дальнейшего использования. Современные решения направлены на уменьшение объемов и перевод жидких радиоактивных отходов в малоподвижные формы. Широко используемым методом является включение радиоактивного материала в состав алюмофосфатного стекла с последующей подготовкой для долговременного хранения.

В табл. 3 представлены рассматриваемые в гипотетическом плане исходные события и наиболее значимые радиационные последствия РА на этапах подготовки радиоактивных материалов к долговременному хранению. Здесь же включены события в результате деградации (коррозии) стальных упаковок или стен хранилища, способные вызвать негативные последствия для окружающей среды в долговременной перспективе.

В качестве максимальной проектной аварии с захораниваемыми остеклованными отходами в пунктах захоронения РАО в скальных породах Нижне-Каннского массива была оценена вероятность возникновения критичности при следующих исходных событиях: потеря механической прочности остеклованной матрицы и внешних оболочек при одновременном попадании воды и последующим образованием гетерогенной системы с выщелоченными ядерными матери-

лами. Вероятность такого события оказалась крайне незначительной и находилась в пределах приемлемого риска¹⁰.

Самоподдерживающаяся цепная реакция

Для каждого рассмотренного этапа обращения с ОЯТ обсуждаемым сценарием РА является СЦР. В имевших место авариях с СЦР зарегистрированы наиболее тяжелые случаи с ранними смертельными исходами. В частности, показано, что случаи кардиоваскулярной формы острой лучевой болезни, закончившиеся смертью пострадавших в сроки от 49 до 120 ч после облучения (дозы ≥ 40 Гр), наблюдались исключительно в условиях аварий с СЦР [22, 23]. При этом пострадавшие всегда подвергались практически мгновенному воздействию интенсивного γ - n -излучения. Вследствие значимой доли нейтронной компоненты в большинстве тяжелых случаев имело место неравномерное распределение поглощенной дозы по телу. В этих случаях, как правило, наблюдается значительный градиент величины дозы по направлению пучка излучения. Разница в величинах поглощенной энергии по глубине тканей и/или в направлении грудь–спина у большинства пострадавших была 3–4-кратной, а в одном случае – 10-кратной за счет большего вклада нейтронов. Возможные медико-санитарные последствия для персонала и населения в результате СЦР приведены в табл. 4.

Важным условием оценки дозы облучения персонала при СЦР является получение данных индивидуальной дозиметрии, что требует разработки соответствующих аварийных нейтронных дозиметров. Использование современных методов определения дозы по величине мощ-

¹⁰ Строительство первоочередных объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край). Стратегический проект № 7 Госкорпорации «Росатом», Том 9 н. ОВОС; ОАО «ВНИПИ протехнологии», 2011.

Таблица 4

Особенности медико-санитарных последствий в результате СЦР
Features of health effects resulting from criticality accident

Исходное событие	Условия формирования радиационной обстановки	Особенности облучения персонала	Факторы облучения населения
В большинстве случаев в результате нарушения инструкций и регламента обращения с ядерными материалами – возникновение условий для образования критической массы с последующим возникновением СЦР	Нахождение облученных лиц в непосредственной близости к месту возникновения СЦР. Необходимо учитывать вклад в дозу рассеянного n -излучения от поверхностей стен и оборудования (для небольших помещений вклад в общую дозу фактора обратного рассеяния может составлять до 20 %). В плане мероприятий по защите персонала необходимо предусматривать проведение йодной профилактики	Число облученных лиц, как правило, не превышает 1–3 чел. Дозы внешнего γ - n -облучения всего тела могут составить несколько Гр и сформироваться в течение секунд (при одиночной вспышке). Возможен крайне неравномерный характер формирования доз в различных частях тела и органах. Ингаляционное поступление в организм радиоактивных изотопов йода и других ПД	Доза облучения населения за счет выброса радиоактивного йода и других ПД за пределы помещения не будет достигать критериев для проведения неотложных и срочных защитных мер

ности дозы γ -излучения по наведенной активности ^{24}Na в тканях необходимо осуществлять в ближайшие часы после факта облучения^{11, 12}.

При СЦР происходит формирование газо-аэрозольного выброса, в том числе радиоактивных инертных газов, изотопов йода и других ПД урана. Опыт имевших место крупных РА с СЦР (Айдахо, 1959 г. [5], Токаймура 1999 г. [10]) свидетельствует, что доза облучения населения в результате аварийного выброса не превышает нескольких мЗв на расстоянии до 200–300 м.

В табл. 5 приведены результаты консервативной оценки образования летучих изотопов йода для гипотетического сценария СЦР топливной композиции ОЯТ легководного реактора с числом делений $\sim 10^{20}$ [24]. В этом случае доза облучения щитовидной железы не превысит нескольких мЗв на расстоянии ~ 1 км от источника.

Таблица 5

Образование летучих изотопов йода для гипотетического сценария СЦР
Formation of volatile iodine isotopes for a hypothetical criticality accident scenario

Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$	Активность, Бк
^{129}I	$1,57 \cdot 10^{10}$ лет	$7,2 \cdot 10^{-3}$
^{130}I	12,36 ч	$8,2 \cdot 10^8$
^{131}I	8,04 сут	$1,4 \cdot 10^9$
^{132}I	2,24 ч	$2,4 \cdot 10^{11}$
$^{132\text{m}}\text{I}$	83,6 ч	$4,0 \cdot 10^{11}$
^{133}I	20,8 ч	$3,8 \cdot 10^{11}$
^{134}I	52,6 мин	$3,6 \cdot 10^{13}$
^{135}I	6,61 ч	$2,8 \cdot 10^{13}$

Таким образом, мероприятия по организации и проведению йодной профилактики в случае аварийной ситуации с СЦР необходимо предусматривать преимущественно в отношении персонала в соответствующих противоаварийных планах и инструкциях.

Внутреннее облучение в результате поступления актинидов в организм

Ведущим дозоформирующим фактором облучения персонала на радиохимическом производстве является внутреннее облучение в результате поступления актинидов в организм ингаляционным путем и через поврежденные кожные покровы (ранения, ссадины,

микротравмы). В настоящее время установлена причинно-следственная связь между поступлением плутония в организм персонала и возникновением рака в органах основного депонирования^{13, 14, 15, 16} [25–28]. Поэтому ингаляцию и раневое поступление актинидов следует рассматривать как значимые факторы риска возникновения отдаленных эффектов, требующих проведения клинико-дозиметрических исследований, а в ряде случаев и безотлагательного медицинского вмешательства, направленного на декорпорацию радионуклидов.

Большое число потенциальных источников поступления аэрозолей плутония и ^{241}Am в воздух производственных помещений, включая мелкие дефекты и неплотности трубопроводов, сорбционных колонок, защитных камер и т.д. приводят к трудно контролируемому загрязнению воздуха. В ряде случаев наличие аварийной ситуации обнаруживается по результатам биофизического контроля работников.

Многолетние и детальные исследования Южно-Уральского института биофизики ФМБА России, посвященные оценке радиационных эффектов в результате поступления плутония в организм персонала ФГУП «ПО «Маяк», позволяют говорить о целесообразности уточнения действующих критериев вмешательства в случае ингаляции плутония. Это касается как некорректности применения эффективной дозы, так и в целом оценки приемлемого риска при облучении органов основного депонирования плутония.

Заключение

Реализация в проектной документации нормативных технических и гигиенических требований, совершенствование и внедрение в производство современных технологий обращения с ОЯТ обеспечивают высокий уровень радиационной безопасности персонала и населения. В то же время, имеющийся исторический опыт, накопленное большое количество радиоактивных и ядерных материалов, находящихся в обращении, обуславливают необходимость поддержания в готовности системы медико-санитарного обеспечения при РА на всех этапах обращения с ОЯТ.

¹³ Романов С.А. Микрораспределение плутония в легких как основа коррекции дозиметрических моделей. Дисс. канд. биол. наук. М., 2003. 113 с.

¹⁴ Щадилов А.Е. Обмен плутония при поступлении через поврежденную кожу человека с учетом влияния ДТПА-терапии. Дисс. канд. биол. наук. М., 2010. 138 с.

¹⁵ МУ 2.6.1.034-2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации «Росатом» и органов и организаций ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241. Методические указания.

¹⁶ МУ 2.6.5.029-2016. Индивидуальный дозиметрический контроль при раневом поступлении плутония и америция. Общие требования. Методические указания.

В целом, оценка возможных медико-санитарных последствий в случае РА на этапах обращения с ОЯТ строится на консервативных предположениях крайне маловероятных исходных событий. Это обстоятельство вызывает основные сложности в противоаварийном планировании на основе разумной достаточности. Разрабатываемые планы медико-санитарного обеспечения должны быть тесно увязаны с объектовыми противоаварийными планами по защите персонала и территориальными планами по защите населения.

Основные особенности медико-санитарных последствий для персонала, которые необходимо учитывать при планировании и проведении диагностических и клинико-дозиметрических мероприятий связаны с облучением в результате СЦР, с ингаляционным и перкутаным поступлением ПД урана и актинидов при загрязнении кожных покровов в случае их повреждения. При авариях на радиохимическом производстве следует также ориентироваться на возможность комбинированных радиационно-термических и радиационно-химических поражений.

Гипотетически медико-санитарные последствия в случае РА со свежим ОЯТ могут быть сопоставимы с масштабной реакторной аварией. При этом уровни радиоактивного загрязнения территории на расстоянии нескольких км от БВ могут потребовать проведения срочных и неотложных защитных мероприятий, включая эвакуацию населения. Значимым фактором РА с ОЯТ со временем выдержки 1–2 мес. является радиоактивный йод, поэтому и в этом случае необходимо предусматривать йодную профилактику в отношении населения на расстоянии до 25–30 км от источника выброса.

Основная потенциальная опасность для населения в случае РА на хранилище ОЯТ заключается в загрязнении территории и облучении долгоживущими ПД и актинидами. Это требует уточнения и разработки соответствующих критериев и производных уровней вмешательства для принятия решений по защитным мерам.

Важным фактором, который также нужно учитывать при планировании медико-санитарных мероприятий, является возможность формирования относительно больших доз облучения кожи и необходимость проведения санитарной обработки пострадавших [29, 30].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. О выполнении обязательств, вытекающих из объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Пятый национальный доклад Российской Федерации. 2017. 161 с.
2. Курьин А.В., Киркин А.М., Маковский С.В., Гусаков-Станюкович И.В. О развитии нормативной базы, устанавливающей подходы к возврату продуктов переработки отработавшего ядерного топлива в государство их поставщика // Ядерная и радиационная безопасность. 2020. Т.95, № 1. С. 15–20.
3. Рачков В.И., Адамов Е.О. Научно-технические проблемы закрытого ядерного топливного цикла двухкомпонентной ядерной энергетики и их решение в проекте направления «Прорыв» // Замыкание топливного цикла ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах: Сборник докладов конференции. Томск, 11–12 октября 2018 г. М.: АО «НИКИЭТ». 2020. С. 6–15.
4. Алексахин Р.М., Будлаков Л.А., Губанов В.А., Дрожко Е.Г., Ильин Л.А., Крышев И.И. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. Ильина Л.А., Губанова В.А. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
5. Маклафин Т.П., Монахан Ш.П., Прувост Н.Л., Фролов В.В., Рязанов Б.Г., Свиридов В.И. Обзор ядерных аварий с возникновением СЦР. Отчет Лос-Аламосской национальной лаборатории LA-13638 (май 2000). Нью-Мексико: Лос-Аламос, 2003. 210 с.
6. IAEA. Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945–2010). EPR-Lessons Learned. Vienna: IAEA, 2012. 154 p.
7. Соловьев В.Ю., Ильин Л.А., Баранов А.Е. Радиационные инциденты, связанные с облучением человека, на территории бывшего СССР до и после Чернобыля // Десятилетие после Чернобыля: оценка последствий аварии: Материалы международной конференции. IAEA-CN-63/6. Вена, 8–12 апреля 1997. Вена: МАГАТЭ, 1997. С. 601–607.
8. Соловьев В.Ю., Барабанова А.В., Бушманов А.Ю., Гуськова А.К., Ильин Л.А. Анализ медицинских последствий радиационных инцидентов на территории бывшего СССР (по материалам регистра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России). Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013. Т.58, № 1. С. 36–42.
9. The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General. GC (59)/14. Vienna: IAEA, 2015. 208 p.
10. Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura, Japan. Vienna: IAEA, 1999. 35 p.
11. IAEA. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. EPR-METHOD 2003. Updating IAEA-TECDOC-953. Vienna: IAEA, 2003. 269 p.
12. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // ICRP. 2007. V.37, No. 2-4. 339 p.
13. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident. ICRP Publication 146 // ICRP. 2020. V.49, No.4. 142 p.
14. IAEA. Inventory of Accidents and Losses at Sea Involving Radioactive Material. IAEA-TECDOC-1242. Vienna: IAEA, 2001. 69 p.
15. Баринков О.П., Канашов Б.А., Комаров С.В., Бучельников А.Е., Шаповалов В.И., Моренко А.И. Подготовка первой авиаперевозки ОЯТ, сертифицированной по новым правилам // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 67–71
16. Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-053-16. 2016.
17. IAEA Safety Standards. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2018 Edition. Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev.1). Vienna: IAEA, 2018. 165p.
18. Медицинские аспекты противодействия радиологическому и ядерному терроризму / Под ред. Ильина Л.А. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2018. 392 с.
19. Требования к планированию и обеспечению готовности к ликвидации последствий аварий при транспортировании ядерных материалов и радиоактивных веществ. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. НП-074-06.
20. Землянухин В.И., Ильенко Е.И., Кондратьев А.Н. и др. Радиохимическая переработка ядерного топлива АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.
21. IAEA. The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk. Vienna: IAEA. 1998. 85 p.
22. Барабанова А.В., Бушманов А.Ю., Соловьев В.Ю. Анализ наиболее тяжелых случаев облучения человека в радиационных авариях, связанных с развитием самопроизвольной цепной реакции // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2011. № 2. С. 32–38.
23. Barabanova A., Wiley A., Bushmanov A. Dose-dependent Analysis of Acute Medical Effects of Mixed Neutron-gamma Radiation from Selected Severe ²³⁵U or ²³⁹Pu Criticality Accidents in USSR, United States, and Argentina // Health Physics. 2012. V.102, No. 4. P. 391–399. DOI: 10.1097/HP.0b013e31823b4b78.
24. Богатов С.А., Гаврилов С.Л., Данилян В.А., Киселев В.П. Оценка выхода радионуклидов для ряда гипотетических аварий на объектах ВМФ. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2001. 33 с.
25. Сокольников М.Э., Востротин В.В., Ефимов А.В., Василенко Е.К., Романов С.А. Пожизненный риск смерти от рака легкого при различных сценариях ингаляционного поступления ²³⁹Pu // Радиация и риск. 2015. Т.24, № 3. С. 59–69.
26. Хохлаков В.Ф. «Дозы-1999, 2000» последовательное совершенствование плутониевой дозиметрии персонала ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2004. № 1. С. 71–82.
27. Хохлаков В.Ф., Кудрявцева Т.И., Шевкунов В.А. Риск поступления плутония и амерция в организм работников радиохимического предприятия через травмированную кожу // Атомная энергия. 1994. Т.77, № 6. С. 445–448.
28. Молоканов А.А., Кухта Б.А., Галушкин Б.А. Расчет дозы внутреннего облучения и возможные варианты нормирования при раневом поступлении радионуклидов плутония // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.65, № 6. С. 27–37. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-6-27-37.
29. Грачев М.И., Саленко Ю.А., Абрамов Ю.В., Фролов Г.П., Клочков В.Н., Кухта Б.А. и др. Операционные величины радиоактивного загрязнения кожи в случае радиационной аварии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т.65, № 3. С. 20–26. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26.
30. Фролов Г.П., Саленко Ю.А., Грачев М.И., Галстян И.А., Клочков В.Н. Проведение санитарной обработки на этапах оказания медицинской помощи пострадавшим в радиационной аварии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т.66, № 3. С. 19–28. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-3-19-28.

REFERENCES

- On Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. The Fifth National Report of the Russian Federation. Moscow Publ., 2017. 161 p. (In Russian).
- Kuryndin A.V., Kirkin A.M., Makovskiy S.V., Gusakov-Stanyukovich I.V. Development of Legal and Regulatory Basis for Approaches to Return of Reprocessing Products of Spent Nuclear Fuel to the Supplier's State. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Nuclear and Radiation Safety Journal. 2020;95;1:15–20. (In Russian).
- Rachkov V.I., Adamov Ye.O. Scientific and Technical Problems of the Closed Nuclear Fuel Cycle of Two-component Nuclear Power and their Solution in the Project "Proryv". *Zamykaniye Toplivoynogo Tsikla Yadernoy Energetiki na Baze Reaktorov na Bystrykh Neytronakh* = Closing the Fuel Cycle of Nuclear Power Based on Fast Breeder Reactors. Proceedings of the Conference. Tomsk, 11-12 October, 2018. Moscow Publ., 2020. P. 6–15 (In Russian).
- Aleksakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A., Drozhko Ye.G., Ilin L.A., Kryshchuk I.I., et al. Major Radiation Accidents: Consequences and Protective Measures. Ed. Ilin L.A., Gubanov V.A. Moscow, IzDAT Publ., 2001. 752 p. (In Russian).
- McLaughlin T.P., Monahan Sh.P., Pruvost N.L., Frolov V.V., Ryazanov B.G., Sviridov V.I. A Review of Criticality Accidents. Los Alamos National Laboratory, LA-13638. May 2000. New Mexico, Los Alamos, 2003. 210 p.
- IAEA. Lessons Learned from the Response to Radiation Emergencies (1945-2010). EPR-Lessons Learned. Vienna, IAEA, 2012. 154 p.
- Solovyev V.Yu., Ilin L.A., Baranov A.Ye. Radiation Incidents Associated with Human Exposure in the Former USSR Before and after Chernobyl. *Desyatiletie posle S Chernobylya: otsenka posledstviy avarii* = A Decade after Chernobyl: an Assessment of the Consequences of the Accident. Proceedings of the International Conference. IAEA-CN-63/6. Vienna, 8-12 April, 1997. Vienna, IAEA, 1997. P. 601-607.
- Solovyev V.Yu., Barabanova A.V., Bushmanov A.Yu., Guskova A.K., Ilin L.A. Review of the Medical Consequences of Radiation Accidents in the Former USSR Territory (Burnsyan FMBC of FMBA of Russia Register Data). *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2013;58;1:36-42 (In Russian).
- The Fukushima Daiichi Accident. Report by the Director General. GC (59)/14. Vienna, IAEA, 2015. 208 p.
- Report on the Preliminary Fact Finding Mission Following the Accident at the Nuclear Fuel Processing Facility in Tokaimura, Japan. Vienna, IAEA, 1999. 35 p.
- IAEA. Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. EPR-METHOD 2003. Updating IAEA-TECDOC-953. Vienna, IAEA, 2003. 269 p.
- Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. ICRP. 2007. V.37, No. 2-4. 339 p.
- Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Radiological Protection of People and the Environment in the Event of a Large Nuclear Accident. ICRP Publication 146. ICRP. 2020. V.49, No.4. 142 p.
- IAEA. Inventory of Accidents and Losses at Sea Involving Radioactive Material. IAEA-TECDOC-1242. Vienna, IAEA, 2001. 69 p.
- Barinkov O.P., Kanashov B.A., Komarov S.V., Buchelnikov A.Ye., Shapovalov V.I., Morenko A.I. Preparation of the First Air Transportation of Spent Nuclear Fuel, Certified According to the New Rules. *Bezopasnost yadernykh tekhnologiy i okruzhayushchey sredy* = Nuclear and Environmental Safety. 2011;1:67-71. (In Russian).
- Safety Rules for the Transportation of Radioactive Materials. Federal Rules and Regulations. NP-053-16. 2016 (In Russian).
- IAEA Safety Standards. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2018 Edition. Specific Safety Requirements No. SSR-6 (Rev.1). Vienna, IAEA, 2018. 165p.
- Medical Aspects of Countering Radiological and Nuclear Terrorism. Ed. Ilyin L.A. Moscow, FMBC Im. A.I. Burnasyan Publ., 2018. 392 p. (In Russian).
- Requirements for planning and ensuring preparedness for the mitigation of the consequences of accidents during the transportation of nuclear materials and radioactive substances. Federal norms and rules. NP-074-06. (In Russian).
- Zemlyanukhin V.I., Ilyenko Ye.I., Kondratyev A.N., et al. Radiochemical Reprocessing of Nuclear Fuel at Nuclear Power Plants. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 280 p. (In Russian).
- IAEA. The Radiological Accident in the Reprocessing Plant at Tomsk. Vienna: IAEA. 1998. 85 p.
- Barabanova A.V., Bushmanov A.Yu., Solovyev V.Yu. An Analysis of the Most Severe Cases of Human Irradiation During Radiation Accidents Related to Spontaneous Chain Reaction. *Mediko-Biologicheskoye i Sotsialno-Psikhologicheskoye Problemy Bezopasnosti V Chrezvychaynykh Situatziyakh* = Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations. 2011;2:32–38. (In Russian).
- Barabanova A., Wiley A., Bushmanov A. Dose-dependent Analysis of Acute Medical Effects of Mixed Neutron-gamma Radiation from Selected Severe ²³⁵U or ²³⁹Pu Criticality Accidents in USSR, United States, and Argentina. *Health Physics*. 2012;102;4:391–399. DOI: 10.1097/HP.0b013e31823b4b78.
- Bogatov S.A., Gavrilov S.L., Danilyan V.A., Kiselev V.P. Assessment of Radioactive Release for Several Hypothetical Navy Ship Accidents. Moscow Publ., 2001. 33 p. (In Russian).
- Sokolnikov M.E., Vostrovin V.V., Yefimov A.V., Vasilenko Ye.K., Romanov S.A. Estimates of Lifetime Risk of Lung Cancer Death under Different Scenarios of ²³⁹Pu Inhalation. *Radiatsiya i risk* = Radiation and Risk. 2015;24;3:59-69. (In Russian).
- Khokhryakov V.F. «Doses – 1999, 2000» Consequent Development of Plutonium Dosimetry for «Mayak» Personnel. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Journal of Radiation Safety Issues. 2004;1:71-82. (In Russian).
- Khokhryakov V.F., Kudryavtseva T.I., Shevkunov V.A. The Risk of Plutonium and Americium Entering the Body of Workers of a Radiochemical Plant through Injured Skin. *Atomnaya Energiya* = Atomic Energy. 1994;77;6:445-448. (In Russian).
- Molokanov A., Kukhta B., Galushkin B. Calculation of Internal Dose and Possible Limits for Intakes of Radionuclides in Case of Plutonium Wounds. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65;6:27–37. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-6-27-37. (In Russian).
- Grachev M.I., Salenko Yu.A., Abramov Yu.V., Frolov G.P., Klochkov V.N., Kukhta B.A. Operational Values of Radioactive Skin Contamination in the Case of Radiological Accident. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65;3:20–26. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-20-26 (In Russian).
- Frolov G.P., Salenko Yu.A., Grachev M.I., Galstyan I.A., Klochkov V.N. Decontamination of Victims in the Event of a Radiation Accident at the Stages of Provision Medical Care. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66;3:19–28. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-3-19-28 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 17.01.2022. **Принята к публикации:** 15.03.2022.

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

Financing. The study had no sponsorship.

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

Article received: 17.01.2022. **Accepted for publication:** 15.03.2022.