

В.И. Архипова, А.М. Лягинская, О.В. Паринов, Е.Г. Метляев, А.С. Самойлов

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ЗАЩИТЫ ЗДОРОВЬЯ ЖЕНЩИН, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ

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

Контактное лицо: Валерия Ильинична Архипова, e-mail: arkhvalery@rambler.ru

РЕФЕРАТ

Актуальность: В существующей международной системе радиационной безопасности (МКРЗ) и в отечественных НРБ – 99/2009 основным принципом защиты является исключение тканевых и снижение стохастических эффектов до приемлемого уровня. Особое внимание уделяется защите гонад, в том числе в целях предохранения будущих поколений. При расчетах риска и вреда заболевания раком и наследственными болезнями используются коэффициенты с усреднением по полу, но признается, что имеются существенные различия величин радиационного риска между мужчинами и женщинами.

Цель: Провести анализ современного состояния и проблемы защиты здоровья женщин, работающих в условиях радиационной опасности.

Материал и методы: Исследование включало анализ существующей системы радиационной защиты женщин в международных рекомендациях (МКРЗ) и отечественных нормах радиационной безопасности и ее эффективности в условиях влияния производства новых видов ядерных технологий (новых видов ядерного топлива) и новых знаний о нехромосомных (цитоплазматических) генетических наследственных структурах в женском организме – второй наследственной структуры.

Результаты: Анализ приведенных данных о современном состоянии системы защиты здоровья женщины, направленной на защиту будущего ребенка, не в полной мере отвечает эффективности защиты здоровья женщин, работающих в условиях высокотехнологичных производств новых видов ядерного топлива и не в полной мере учитывают новые знания о нехромосомных мутациях, как о второй наследственной структуре женского организма, что приводит к очевидному выводу: требуется дальнейшее изучение параметров здоровья работников радиационно опасных производств и дальнейшее совершенствование мер по охране женского здоровья.

Ключевые слова: радиационная безопасность, здоровье женщин, митохондриальная наследственность, радиационная защита, гонады, генетика

Для цитирования: Архипова В.И., Лягинская А.М., Паринов О.В., Метляев Е.Г., Самойлов А.С. Современное состояние и проблемы защиты здоровья женщин, работающих в условиях радиационной опасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 3. С. 48–53. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-48-53

V.I. Arkhipova, A.M. Lyaginskaya, O.V. Parinov, E.G. Metlyaev, A.S. Samoylov

The Current State and Problems of Health Protection of Women Working in Conditions of Radiation Hazard

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

Contact person: Valeria I. Arkhipova, e-mail: arkhvalery@rambler.ru

ABSTRACT

Relevance: In the existing international radiation safety system (ICRP) and in national RSS - 99/2009, the main principle of protection is the exclusion of tissue and reduction of stochastic effects to an acceptable level. Particular attention is paid to the protection of the gonads, including for the purpose of protecting future generations. When calculating the risk and harm of cancer and hereditary diseases, coefficients with gender averaging are used, but it is recognized that there are significant differences in the values of radiation risk between men and women.

Purpose: To analyze the current state and problems of protecting the health of women working in radiation hazardous conditions.

Results: The analysis of the presented data on the current state of protection of the women's health system aimed at protecting the unborn child does not fully meet the effectiveness of protecting the health of women working in high-tech production of new types of nuclear fuel and does not fully take into account new knowledge about non-chromosomal mutations as the second hereditary structure of the female body, which leads to the obvious conclusion: further study of the health parameters of workers in radiation hazardous industries and further improvement of measures to protect women's health are required.

Keywords: radiation safety, women's health, mitochondrial inheritance, radiation protection, gonads, genetics

For citation: Arkhipova VI, Lyaginskaya AM, Parinov OV, Metlyaev EG, Samoylov AS. The Current State and Problems of Health Protection of Women Working in Conditions of Radiation Hazard. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(3):48–53. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-48-53

Введение

В современной радиобиологии (радиационная генетика) основные сведения о действии радиации на генетические наследственные структуры получены в эксперименте на мужских особях, в процессе изучения хромосомных мутаций (ядерная ДНК). В связи с невозможностью исследовать мутационные процессы в женской половой клетке, поскольку формирование наследственного генома в женском организме протекает у человека внутриутробно, принято, что генетические эффекты облучения, т. е. радиочувствительность наследственных генетических структур у мужских и женских особей одинаковы.

Открытие в 60-х годах нехромосомных цитоплазматических мутаций, реализуемых в митохондриях и в пластидах, привело к пониманию существования у женщин второй наследственной структуры, что меняет представление о равной радиочувствительности мужских и женских наследственных структур. Важным фактором, обуславливающим повышенное внимание к проблеме радиологической защиты женщины, является также развитие новых высокотоксичных ядерных технологий (производство новых видов ядерного топлива) и рост занятости женщин на этих производствах.

Настоящее аналитическое исследование направлено на выявление эффективности радиологической защиты женщины в условиях новых ядерных технологий и новых знаний о «второй наследственной структуре» у женщин. Целью работы является анализ современного состояния и проблемы защиты здоровья женщин, работающих в условиях радиационной опасности.

Материал и методы

В работе проведен анализ существующей системы радиационной защиты женщин в международных рекомендациях Международной комиссии по радиационной защите и отечественных нормах радиационной безопасности и ее эффективности в условиях влияния ядерных технологий новых видов (ядерного топлива) и новых знаний о нехромосомных (цитоплазматических) генетических наследственных структурах в женском организме – второй наследственной структуры.

Результаты и обсуждение

В настоящее время в системе радиационной безопасности основным принципом защиты человека является исключение тканевых эффектов и снижение риска стохастических эффектов до разумно приемлемого уровня [1].

В качестве основы нормирования профессионального облучения в отечественных НРБ99/2009 введена величина эффективной дозы 20 мЗв в год, учитывающей стохастические канцерогенные и наследственные (генетические) эффекты. Наследственные эффекты – это фактор репродуктивного возраста – репродуктивного здоровья, возникающий вследствие облучения гонад.

В системе радиационной безопасности защите гонад уделяется особое внимание в связи с их высокой радиочувствительностью и возможностью передачи негативных последствий облучения ряду последующих поколений. Наряду с введением величины эффективной дозы, ограничивающей риски канцерогенных и генетических эффектов, в отечественных НРБ 99/2009 для лиц репродуктивного возраста введены дополнительные ограничения для защиты будущих поколений [1]. Так, для женщин до 45 лет, работающих с источниками ионизирующего излучения, эквивалентная доза на поверхности нижней части живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно превышать 1/20 от

годового поступления; для мужчин планируемое повышение облучения допускается в возрасте старше 30 лет при их добровольном согласии и после информирования о возможных дозах облучения и риске для здоровья [1].

Основными генетическими эффектами в человеческой популяции являются врожденные пороки развития (ВПР), летальность и хромосомные наследственные болезни. В настоящее время доказана связь ВПР с облучением мужчины, и признается генетическая природа радиационно-индуцированных ВПР [2]. Опубликованы данные об увеличении частоты ВПР, летальности плода и ранней неонатальной смертности детей в семьях мужчин – профессионалов предприятий атомной промышленности в Великобритании, США, Индии и России при суммарных дозах облучения гонад мужчин к моменту зачатия 100 мЗв и выше.

В связи с особенностями развития женских гонад, генетические структуры которых формируются в период внутриутробного развития, доказательных данных о влиянии радиации на геном женских гонад не имеется, и по генетическим эффектам чувствительность мужских и женских гонад признана одинаковой [1, 11].

В 2007 г. в Публикации 103 МКРЗ пересмотрена методология оценки наследственного радиационно-индуцированного вреда, включающего в себя риски многофакторных патологий (к которым относится более 50 % ВПР). Отмечено, что большие многолокусные делеции генов, составляющие доминирующий класс радиационно-индуцированных мутаций, имеют форму мультисистемных аномалий, а не заболеваний, связанных с одним геном. На этой основе сформирована концепция, что основные радиационно-индуцированные генетические дефекты могут наследоваться по аутосомно-доминантному типу наследования, достаточного от одного родителя для проявления патологических состояний уже в первом поколении потомков.

При модифицировании риска и расчетах вреда заболевания раком и наследственными болезнями МКРЗ использовала коэффициенты с усреднением по полу. Однако, сохранив этот подход, Комиссия признает существенно значимые различия величин радиационного риска между мужчинами и женщинами [1]. Женщины и мужчины различаются по хромосомной структуре, белковым и генным продуктам, геномному импринтингу, экспрессии генов, сигнальным путям и гормональному профилю [12].

В 60-х годах прошлого столетия в органеллах цитоплазмы – пластидах и митохондриях были обнаружены собственные относительно автономные генетические и белковосинтезирующие системы. В дальнейшем были сформированы современные представления о природе нехромосомных мутаций и о роли мутагенеза внеядерной ДНК у женщин, как о «второй» наследственной структуре [13]. Процесс образования «второй» наследственной структуры женского организма происходит во внутриутробной жизни, все оогонии вступают в мейоз на 9–22-й неделе внутриутробного развития, в дальнейшем происходит только созревание уже сформированных фолликулов [14].

В процессе оплодотворения у человека при слиянии мужских и женских гамет в оплодотворенную яйцеклетку кроме ядер переходят цитоплазматические структуры – митохондрии и аппарат Гольджи – материнского организма (сперматозоид не содержит цитоплазмы). Генетический материал оплодотворенной яйцеклетки – будущего зародыша будет нести в себе кроме хромосомной «вторую» – только материнскую – цитоплазматическую систему наследования [15].

В настоящее время исследовано значительное число заболеваний, этиология которых связывается с изменениями митохондриальной ДНК (мтДНК) яйцеклетки. Показано, что мутации мтДНК яйцеклетки, такие как апоптоз и снижение энергетического потенциала митохондрий, ассоциируются со снижением фертильности, повышенным риском спонтанных выкидышей и аномалий развития, а также рядом заболеваний (рак, энцефалопатия, нейросенсорная глухота и др.), наследуемых по материнской линии [16].

Также установлен целый ряд заболеваний, генез которых обусловлен патологией мтДНК: митохондриальная миопатия [17], наследственная нейропатия зрительного нерва Лебера, нейросенсорная глухота, хроническая прогрессирующая внешняя офтальмоплегия, энцефалопатия [18], лактат-ацидоз [18], синдром Лея, синдром Пирсона и др. [19].

Сведения о действии ионизирующего излучения на митохондриальную генетическую структуру ограничены. Основное внимание уделяется радиационно-индуцированному нарушению энергетического метаболизма – фундаментальной основе действия радиации на живой организм [20]. Приводятся данные о сохранении и даже усилении устойчивости цитоплазматических структур клетки к летальному действию (8 Гр) радиации [8, 21, 22]. В 2023 г. опубликована работа о пострадиационном механизме функционирования и стабилизации митохондриального генома при облучении мышей в дозах 1–5 Гр [23]. Показано, что при облучении мышей в указанных дозах наблюдается повышенный уровень мутантных копий мтДНК в тканях головного мозга и селезенке, который зависит от дозы и вида ткани (органа): в селезенке уровень мутантных копий выше, чем в тканях головного мозга, а радиочувствительность мтДНК в 2–3 раза выше, чем у ядерной ДНК.

В этой же работе показано, что мелатонин в тканях селезенки самцов крыс и коры головного мозга облученных мышей проявляет выраженные радиозащитные свойства при ведении его до и после воздействия радиацией. Мелатонин стимулирует пострадиационное восстановление ядерной ДНК и мтДНК, снижает уровень мутантных копий мтДНК, а также восстанавливает митохондриальные функции в тканях селезенки крыс и коры головного мозга после облучения [23].

Приведенные данные позволяют допустить, что выявленные закономерности изменений мтДНК в селезенке и головном мозге будут характерны и для мтДНК яйцеклетки, радиочувствительность которой выше, чем клеток селезенки и головного мозга. Ионизирующее излучение оказывает влияние на все виды ДНК, РНК клетки, как ядерные, так и цитоплазматические. Однако в соматических клетках изменение внеядерного генетического материала приводит либо к гибели клетки непосредственно после воздействия радиации, либо при последующих делениях клетки устраняются генетические дефекты. Поскольку мейотическое формирование яйцеклеток женщины происходит еще внутриутробно, то у взрослой женщины, подвергшейся во взрослом состоянии воздействию радиации, отсутствует механизм, способствующий восстановлению генетического материала митохондрий и комплекса Гольджи, то соответственно, измененный генетический материал может быть передан потомству, что может сказаться как на развитии плода, так и на здоровье потомков в целом [20, 24].

Поскольку мтДНК является «вторым» наследственным женским фактором передачи изменений в поколения потомков, и облучение женских гонад обуславливает более высокий генетический риск для будущих

поколений, то очевидно, что здоровье женщины должно рассматриваться как критический компонент здоровья популяции в целом, а дополнительные меры защиты не должны быть направлены только на защиту плода, но и на защиту репродуктивного здоровья женщин в целом.

На основании обобщенных эпидемиологических данных научный Комитет по атомной радиации при ООН (НКДАР ООН) пришел к заключению, что к числу наиболее серьезных последствий воздействия радиации на человека относятся последствия облучения женских репродуктивных органов, которые проявляются развитием функциональных и органических изменений в органах репродуктивной системы (бесплодие, опухоли яичников, расстройства менструальной функции и др.) и повреждением хромосомного, цитоплазматического и генетического аппарата, обуславливающего передачу патологии в ряд последующих поколений [25].

Кроме вышеизложенного, необходимо учитывать, что функционирование всей репродуктивной системы у женщины тесно связано с работой других эндокринных органов, которые играют важную роль в регуляции и функции яичников, в отличие от мужской репродуктивной системы, где воздействие эндокринной системы в целом не столь выражено. Нарушение работы яичников может способствовать развитию различных эндокринных заболеваний и патологических состояний, таких как нарушение толерантности к глюкозе, гиперинсулинизм и различные метаболические и нейроэндокринные синдромы, влияющие на зачатие, течение беременности и развитие плода.

Индикатором репродуктивного здоровья женщины являются результаты беременности (осложнения в период беременности, исходы родов, здоровье рожденного ребенка) [26].

В настоящее время в нашей стране в систему медицинского наблюдения работников, занятых на радиационно-опасных предприятиях, не включены показатели репродуктивного здоровья женщин, кроме заболеваний раком молочной железы, матки и шейки матки. При обследовании проводится исследование цитологического цервикального мазка и маммография у женщин в возрасте свыше 45 лет (Приказ Минздрава России № 749н от 28.07.2020).

Вместе с тем, тенденцией последних лет в стране является увеличение количества женщин, участвующих в работах на предприятиях атомной промышленности и энергетики, что в значительной степени связано с социально-экономическими факторами. По данным Госкорпорации «Росатом», в 2021 году в корпорации и ее организациях работало 288,5 тыс. чел., из этого числа 68 % составляли мужчины и 32 % – женщины, практически одну треть числа всех работников. Согласно данным Агентства по ядерной энергии ОЭСР, в мировой атомной отрасли средний процент женщин составляет 24,7 % [27].

Следует отметить, что дальнейшее развитие отрасли связано с переходом на новые виды ядерного топлива – СНУП-топливо, являющегося одним из наиболее перспективных [28–31], требует дальнейшего изучения воздействия внешнего и внутреннего облучения, химического воздействия на персонал.

Использование оружейного плутония при производстве в топливном цикле создает потенциальную высокую токсичность, в первую очередь за счет использования плутония, одного из самых радиотоксичных элементов, и его нитридных соединений, что неизбежно приводит к изменению радионуклидного состава аэрозолей воздуха рабочей зоны и росту внешнего гамма-ней-

тронного излучения на рабочих местах по сравнению с производством топлива на основе урана. Учитывая, что при производстве смешанного топлива возможно нерадиационное воздействие на персонал токсических веществ, используемых и образующихся при производстве топлива, на данном производстве персонал подвергается значительно большему риску, чем работники предприятий по производству уранового топлива или при работе с плутонием [32]. Анализ радиационного состава СНУП-топлива показал, что дозобразующим радионуклидом является ^{239}Pu . Его вклад в объемную активность составляет 75–80 % всей активности [32–34].

При использовании в качестве сырья для изготовления СНУП-топлива облученных ядерных материалов уровни гамма-нейтронного излучения достаточно высоки. Кроме того, отличается радионуклидный состав аэрозолей.

Опубликованы данные о высокой заболеваемости работников производства СНУП-топлива, составляющие 1064,5±65,5 на 1000 чел. и о широком спектре классов болезней с повышенной заболеваемостью, относящихся к критическим к действию радиации. К числу последних относится класс болезней мочеполовой системы, составляющий 6 % всей заболеваемости [34].

Наряду с высокой радиотоксичностью, плутоний относится к высоко генетически опасным радионуклидам (^{239}Pu , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , ^{131}I) [34, 35]. В эксперименте на мышах показано, что относительная биологическая эффективность (ОБЭ) ^{238}Pu по наследственным генетическим эффектам по сравнению с γ -излучением существенно выше и составляет коэффициент от 10 до 40 (в среднем 20) [36–38].

Оценивая высокий радиационно-индуцированный генетический риск СНУП-топлива, следует отметить также химическую составляющую наследственного риска СНУП-топлива, которым является смешанное нитридное уран-плутониевое соединение. Окислы азота, нитриты, нитраты и их соединения относятся к ка-

тегории естественных химических мутагенов. В случае поражения генетического аппарата зародышевых клеток отрицательные последствия выражаются в возрастании мутантных генов, то есть в увеличении мутационного груза [39, 40]. Подчеркивается корреляция связи между мутагенными и канцерогенными эффектами этих химических соединений [39, 40].

Поскольку все генетические исследования выполнены на мужских половых клетках, которые не содержат цитоплазматической генетической структуры, то очевидно, что все генетические эффекты относятся к ядерной ДНК. В отличие от сперматозоида у мужчин, в женской половой клетке – яйцеклетке, ядерная и цитоплазматическая ДНК при воздействии химических мутагенов будут подвергаться изменениям, соответственно генетические последствия облучения женской половой клетки будут более серьезными. Приведенные данные определяют высокую степень актуальности контроля состояния репродуктивного здоровья женщин, занятых в работах на высоко радиационно-опасных производствах нового ядерного топлива.

Заключение

Изложенные данные о современном состоянии и проблеме защиты здоровья женщин, работающих в условиях радиационной опасности, позволяет отметить, что существующие рекомендации по охране здоровья женщин не в полной мере отвечают условиям работы на высокотехнологичных производствах ядерного топлива новых видов и не в полной мере учитывают новые знания о хромосомных цитоплазматических мутациях, как о «второй» наследственной структуре женского организма, что приводит к очевидному выводу: требуется дальнейшее изучение параметров здоровья работниц радиационно-опасных производств и дальнейшее совершенствование мер по охране женского здоровья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Под общей ред. М.Ф.Киселёва и Н.К.Шандалы. М.: Алана, 2009. 312 с.
2. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
3. Петоян И.М., Шандала Н.К., Лягинская А.М., Метляев Е.Г. Состояние здоровья новорожденных детей в семьях мужчин персонала атомных станций // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т.68. №2. С. 80-84. doi:10.33266/1024-6177-2023-68-2-80-84.
4. Parker L., Pears M.S., Dockinson H.O., Aitkin M., Craft A.W. Stillbirths among Offspring of Male Radiation Workers at Sellafield Nuclear Reprocessing Plant // Lancet. 1999 Oct 23. V.354. No.9188. P. 1407–1414. doi:10.1016/S0140-6736(99)04138-0.
5. Lowell E.S., Ethel S.G., Nancy A.H., James M.M. A Case-Control Study of Congenital Malformations and Occupational Exposure to Low-Level Ionizing Radiation // Am. J. Epidemiology. 1988 February. V.127. No.2. P. 226-242. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114799.
6. Neel J.V., Kato H., Schull W.J. Mortality in the Children of Atomic Bomb Survivors and Controls // Genetics. 1974 Feb. V.76. No.2. P. 311-36. doi:10.1093/genetics/76.2.311.
7. Петрушкина Н.П. Здоровье потомков (1–2 поколение) работников первого предприятия атомной промышленности производственного объединения «Маяк» (клинико-эпидемиологическое исследование): Дис.... докт. мед. наук. М., 2003. 371 с.
8. Лягинская А.М., Петоян И.М., Ермалицкий А.П., Купцов В.В., Карелина Н.М. Радиационно-гигиенические аспекты состояния репродуктивного здоровья мужчин персонала АЭС // Гигиена и Санитария. 2017. Т.96. №96. С. 883-887. doi: 10.47470/0016-9900-2017-96-9-883-887.
9. Осипов В.А., Лягинская А.М., Петоян И.М., Ермалицкий А.П., Карелина Н.М. Врожденные пороки развития у детей персонала Смоленской АЭС и их связь с профессиональным облучением отцов // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2014. Т.59. №4. С. 18-24.
10. Петоян И.М., Лягинская А.М., Ермалицкий А.П., Купцов В.В., Карелина Н. М., Цовьянов А.Г., Самойлов А.С. Состояние репродуктивного здоровья мужчин персонала Курской АЭС // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2019. Т.64. №1. С. 21-25. doi:10.12737/article_5c55fb247614e5.98844114.
11. Радиационная безопасность: Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация 60. Ч.2. М.: Энергоатомиздат, 1994. 208 с.
12. Гинтер Е.К., Пузырев В.П., Скоблов М.Ю., Куцев С.И. Медицинская генетика: Национальное руководство. М.: Гэотар-Медиа, 2022. 896 с.
13. Давыденко О.Г. Нехромосомные мутации. Минск: Наука и техника, 1984. 165 с.
14. Петров И.А., Дмитриева М.Л., Тихоновская О.А., Петрова М.С., Логвинов С.В. Тканевые и молекулярные основы фолликулогенеза. Старение яичников // Проблемы репродукции. 2017. Т.23. №4. С.18-23. doi: 10.17116/rep201723418-23.
15. Палилова А.Н. Нехромосомная наследственность. Минск: Наука и Техника, 1981. 184 с.
16. Suomalainen A. Mitochondrial DNA and Disease // Annals of Medicine. 1997. V.29. No.3. P. 235-246. doi: 10.3109/07853899708999341.
17. Chinnery P.F., Johnson M.A., Wardell T.M., Singh-Kler R., Hayes C., Brown D.T., Taylor R. W., Bindoff L.A., Turnbull D.M. The Epidemiology of Pathogenic Mitochondrial DNA Mutations // Ann Neurol. 2000. V.48. No.2. P. 188-93.
18. Majamaa K., Moilanen J. S., Uimonen S., Remes A. M., Salmela P. I., Karppa M., Majamaa-Voltti K.A., Rusanen H., Sorri M., Peuhkurinen K.J., Hassinen I.E. Epidemiology of A3243G, the Mutation for Mitochondrial Encephalomyopathy, Lactic Acidosis, and Stroke-like Episodes: Prevalence of the Mutation in an Adult Population // Am J Hum Genet. 1998. V.63. No.2. P. 447–54.

19. Schapira A.H. Mitochondrial Disease // *Lancet*. 2006. V.368. No.9529. P. 70-82.
20. Радиационно-химические, молекулярные и биохимические основы биологического действия излучений. Радиационная медицина / Под общ. ред. Л.А.Ильина // Теоретические основы радиационной медицины. Т.1. М.: ИздАТ, 2004. С.122-157.
21. Иванов И.И. Биоэнергетика в тканях и клетках при остром и лучевом поражении // Проблемы энергетики в облученном организме. Т. VI. М.: Атомиздат, 1977. С. 196-201.
22. Манойлов С.Е. Корреляция между радиочувствительностью и состоянием биоэнергетики // Проблемы энергетики в облученном организме. Т. VI. М.: Атомиздат, 1977. С.128-153.
23. Абдуллаев С.А. Пострадиационные механизмы функционирования и стабилизации митохондриального генома: Автореф. ... докт. биол. наук. М., 2023. 45 с.
24. Forster L., Forster P., Lutz-Bonengel S., Willkomm H., Brinkmann B. Natural Radioactivity and Human Mitochondrial DNA Mutations // *Proc Natl Acad Sci US A*. 2002 Oct 15. V.99. No.21. P. 13950-13954. doi: 10.1073/pnas.202400499.
25. UNSCEAR 2001 Report: Hereditary Effects of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. New York, UNSCEAR, 2001. 160 p.
26. Айламазян Э.К., Беляева Т.А., Виноградова Е.Г. и др. Репродуктивное здоровье женщины как критерий биоэкологической оценки окружающей среды // *Вестник Российской ассоциации акушер-гинекологов*. 1997. №3. С. 72-78.
27. Отчет о прогрессе в области устойчивого развития. М.: Росатом, 2021. Электронный ресурс: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2021/rosatom_esg_2021.pdf.
28. 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*. 2001. Т.6. №3. С. 9-12. doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-3-9-12
29. Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И., Рачков В.И., Троянов В.М., Хомяков Ю.С., Леонов В.Н. Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах // *Известия Академии наук, энергетика*. 2015. №32. С. 3-15.
30. Батова З.Г., Кочетков О.А., Монастырская С.Г., Саяпин Н.П., Симаков А.В., Степанов С.В., Исаев О.В. Гигиена труда в атомной промышленности и энергии / Под общ. ред. Л.А.Ильина // *Радиационная медицина*. Т. III. М.: ИздАТ, 2002. С. 230-234.
31. Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В., Рачков В.И., Хомяков Ю.С. Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных радионуклидов в ЯТЦ – эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ // *Известия Академии наук, энергетика*. 2015. №6. С. 15-25.
32. Цовьянов А.Г., Карев А.Е., Шинкарев С.М., Коренков И.П., Самойлов А.С., Стебельков В.А., Жуков А.В., Измestьев К.М., Терентьев С.Г. Дисперсность, морфология и элементарный состав аэрозольных частиц на производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива // *Медицинская радиология*. 2020. №3. С. 59-65. doi: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-59-65.
33. Самойлов А.С., Шандала Н.К., Бушманов А.Ю., Шинкарев С.М., Цовьянов А.Г., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Г.А., Симаков А.В., Клочков В.Н. Оценка доз облучения персонала комплексных экспериментальных установок на СХК на производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива // *Медицинская радиология и Радиационная безопасность*. 2020. №6.
34. Самойлов А.С., Метляев Е.Г., Лягинская А.М. Галстян И.А., Паринов О.В., Торубаров Ф.С., Карелина Н.М., Ермалицкий А.П., Петоян И.М., Воскальчук Н.С., Каверина Т.Н. Заключение о состоянии заболеваемости работников производства СХУП-топлива по результатам проведенного сравнительного анализа: Отчет о НИР «Разработка временных рекомендаций по проведению медицинских осмотров работников производства СХУП-топлива» по договору: №11/13917Д от 01.10.2020. 56 с.
35. Плутоний. Радиационная безопасность / Под общей ред. Л.А.Ильина. М.: ИздАТ, 2005. 415 с.
36. Техногенное облучение и безопасность человека / Под общей ред. Л.А.Ильина. М.: ИздАТ, 2006. 303 с.
37. Померанцева М.Д., Рамайтис Л.К., Шевченко В.А., Лягинская А.М., Дементьев С.И. Индукция генетических повреждений инкорпорированным ²³⁸Pu в половых клетках // *Радиобиология*. 1987. Т.27. С. 206-209.
38. Pomerantseva M.D., Ramaya L.K., Vilkin G.A., Shevchenko V.A., Lyaginskaya A.M. Evaluation of the Genetic Effects of ²³⁸Pu Incorporated into Mice // *J. Mutation Res*. 1986. No.226. P. 93-98.
39. Померанцева М.Д., Рамайтис Л.К., Шевченко В.А., Лягинская А.М. Оценка генетических эффектов поступления ²³⁸Pu в организм млекопитающих // *Генетика*. 1988. Т.24. №4. С. 176-181.
40. Наследственность человека и окружающая среда: Программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера». 1984. 199 с.
41. Ильин Л. А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., Клочков В.Н., Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меньяло А.Н., Туманов К.А., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Ч.2: Дозы и риски // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2022. Т.67. №1. С. 39-45. doi: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45.

REFERENCES

1. Publication 103 of the International Commission on Radiological Protection (ICRP3). Ed. M.F.Kiselev, N.K.Shandala. Moscow, Alana Publ., 2009. 312 p. (In Russ.).
2. *Normy Radiatsionnoy Bezopasnosti NRB-99/2009: Sanitarno-Epidemiologicheskiye Pravila i Normativy* = Radiation Safety Standards NRB-99/2009: Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations. Moscow, Federal'nyy Tsentri Gigiyeny i Epidemiologii Rospotrebnadzora Publ., 2009. 100 p. (In Russ.).
3. Petoyan I.M., Shandala N.K., Lyaginskaya A.M., Metlyayev Ye.G. Health Status of Newborn Children in Families of Male Personnel of Nuclear Power Plants. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2023;68:2:80-84. doi: 10.33266/1024-6177-2023-68-2-80-84 (In Russ.).
4. Parker L., Pears M.S., Dockinson H.O., Aitkin M., Craft A.W. Stillbirths among Offspring of Male Radiation Workers at Sellafield Nuclear Reprocessing Plant. *Lancet*. 1999 Oct 23;354:9188:1407-1414. doi:10.1016/S0140-6736(99)04138-0.
5. Lowell E.S., Ethel S.G., Nancy A.H., James M.M. A Case-Control Study of Congenital Malformations and Occupational Exposure to Low-Level Ionizing Radiation. *Am. J. Epidemiology*. 1988 Feb; 127:2:226-242. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114799.
6. Neel J.V., Kato H., Schull W.J. Mortality in the Children of Atomic Bomb Survivors and Controls. *Genetics*. 1974 Feb;76:2:311-36. doi:10.1093/genetics/76.2.311
7. Petrushkina N.P. *Zdorov'ye Potomkov (1-2 Pokoleniya) Rabotnikov Pervogo Predpriyatiya Atomnoy Promyshlennosti Proizvodstvennogo Ob'yedineniya «Mayak» (Kliniko-Epidemiologicheskoye Issledovaniye)* = Health of Descendants (1-2 Generations) of Workers of the First Nuclear Industry Enterprise, the Mayak Production Association (Clinical and Epidemiological Study). Doctor's Thesis (Med). Moscow Publ., 2003. 371 p. (In Russ.).
8. Lyaginskaya A.M., Petoyan I.M., Yermalitskiy A.P., Kuptsov V.V., Karelina N.M. Radiation-Hygienic Aspects of the Reproductive Health of Male NPP Personnel. *Gigiyena i Sanitariya* = Hygiene and Sanitation. 2017;96:96:883-887 (In Russ.). doi: 10.47470/0016-9900-2017-96-9-883-887
9. Osipov V.A., Lyaginskaya A.M., Petoyan I.M., Yermalitskiy A.P., Karelina N.M. Congenital Malformations in Children of Smolensk NPP Personnel and their Relationship with Occupational Exposure of Fathers. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2014;59:4:18-24.
10. Petoyan I.M., Lyaginskaya A.M., Yermalitskiy A.P., Kuptsov V.V., Karelina N. M., Tsovy'yanov A.G., Samoylov A.S. Reproductive Health Status of Male Personnel of the Kursk NPP. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2019;64:1:21-25 (In Russ.). doi:10.12737/article_5c55fb247614e598844114.
11. *Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Radiation Safety. ICRP Recommendations 1990. Publ. 60. Part 2. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 208 p. (In Russ.).
12. Ginter Ye.K., Puzyrev V.P., Skoblov M.Yu., Kutsev S.I. *Meditsinskaya Genetika* = Medical Genetics. National Guide. Moscow, Geotar-Media Publ., 2022. 896 p. (In Russ.).
13. Davydenko O.G. *Nekhromosomnyye Mutatsii* = Non-Chromosomal Mutations. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1984. 165 p. (In Russ.).
14. Petrov I.A., Dmitriyeva M.L., Tikhonovskaya O.A., Petrova M.S., Logvinov S.V. Tissue and Molecular Bases of Folliculogenesis. Ovarian Aging. *Problemy Reproduktsii* = Problems of Reproduction. 2017;23:4:18-23 (In Russ.). doi: 10.17116/repro201723418-23.
15. Palilova A.N. *Nekhromosomnaya Nasledstvennost'* = Non-Chromosomal Heredity. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ., 1981. 184 p. (In Russ.).
16. Suomalainen A. Mitochondrial DNA and Disease. *Annals of Medicine*. 1997;29:3:235-246. doi: 10.3109/07853899708999341.
17. Chinnery P.F., Johnson M.A., Wardell T.M., Singh-Kler R., Hayes C., Brown D.T., Taylor R. W., Bindoff L.A., Turnbull D.M. The Epidemiology of Pathogenic Mitochondrial DNA Mutations. *Ann Neurol*. 2000;48:2:188-93.

18. Majamaa K., Moilanen J. S., Uimonen S., Remes A. M., Salmela P. I., Karppa M., Majamaa-Voltti K.A., Rusanen H., Sorri M., Peuhkurinen K.J., Hassinen I.E. Epidemiology of A3243G, the Mutation for Mitochondrial Encephalomyopathy, Lactic Acidosis, and Stroke-like Episodes: Prevalence of the Mutation in an Adult Population. *Am J Hum Genet.* 1998;63:2:447-54.
19. Schapira A.H. Mitochondrial Diseases. *Lancet.* 2006;368;9529:70-82.
20. Radiation-Chemical, Molecular and Biochemical Bases of Biological Action of Radiation. *Radiation Medicine.* Ed. L.A.II'in. *Teoreticheskiye Osnovy Radiatsionnoy Meditsiny* = Theoretical Bases of Radiation Medicine. Vol.1. Moscow, Izdat Publ., 2004. P.122-157 (In Russ.).
21. Ivanov I.I. Bioenergetics in Tissues and Cells in Acute and Radiation Injury. *Problemy Energetiki v Obluchennom Organizme* = Problems of Energetics in the Irradiated Organism. Vol.VI. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. P. 196-201 (In Russ.).
22. Manoylov S.Ye. Correlation Between Radiosensitivity and the State of Bioenergetics. *Problemy Energetiki v Obluchennom Organizme* = Problems of Energetics in the Irradiated Organism. Vol.VI. Moscow, Atomizdat Publ., 1977. P. 128-153 (In Russ.).
23. Abdullayev S.A. *Postradiatsionnyye Mekhanizmy Funktsionirovaniya i Stabilizatsii Mitokhondrial'nogo Genoma* = Post-Radiation Mechanisms of Functioning and Stabilization of the Mitochondrial Genome. Extended Abstract of Doctor's Thesis (Biol.). Moscow Publ., 2023. 45 p. (In Russ.).
24. Forster L., Forster P., Lutz-Bonengel S., Willkomm H., Brinkmann B. Natural Radioactivity and Human Mitochondrial DNA Mutations. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2002 Oct 15;99;21:13950-13954. doi: 10.1073/pnas.202400499.
25. UNSCEAR 2001 Report: Hereditary Effects of Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2001. Report to the General Assembly, with Scientific Annex. New York, 2001. 160 p.
26. Aylamazyan E.K., Belyayeva T.A., Vinogradova Ye.G., et al. Women's Reproductive Health as a Criterion for Bioecological Assessment of the Environment. *Vestnik Rossiyskoy Assotsiatsii Akusherov-Ginekologov* = Bulletin of the Russian Association of Obstetricians and Gynecologists. 1997;3:72-78 (In Russ.).
27. Sustainable Development Progress Report. Moscow, Rosatom Publ., 2021. URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2021/rosatom_esg_2021.pdf.
28. Parinov O.V., Lyaginskaya A.M., Shandala N.K., Metlyayev Ye.G., Kuptsov V.V. Problems of Assessing the Health Status of Personnel Working in Conditions of New Nuclear Fuel Production Technologies. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2001;6;3:9-12 (In Russ.). doi: 10.12737/1024-6177-2021-66-3-9-12.
29. Adamov Ye.O., Zabud'ko L.M., Matveyev V.I., Rachkov V.I., Troyanov B.M., Khomyakov Yu.S., Leonov V.N. Comparative Analysis of the Advantages and Disadvantages of Using Metallic and Nitride Mixed Uranium-Plutonium Fuel in Fast Reactors. *Izvestiya Akademii Nauk, Energetika* = Bulletin of the Academy of Sciences, Power Engineering. 2015;32:3-15 (In Russ.).
30. Batova Z.G., Kochetkov O.A., Monastyrskaya S.G., Sayapin N.P., Simakov A.V., Stepanov S.V., Isayev O.V. Occupational Hygiene in the Nuclear Industry and Energy. *Radiatsionnaya Meditsina* = Radiation Medicine. Vol. III. Ed. L.A.II'in. Moscow, Izdat Publ., 2002. P. 230-234 (In Russ.).
31. Adamov Ye.O., Vlaskin G.N., Lopatkin A.V., Rachkov V.I., Khomyakov Yu.S. Radiation-Equivalent Handling of Radioactive Radionuclides in the NFC - an Effective Alternative to the Deferred Solution to the Problem of SNF Accumulation. *Izvestiya Akademii Nauk, Energetika* = Bulletin of the Academy of Sciences, Power Engineering. 2015;6:15-25 (In Russ.).
32. Tsov'yanov A.G., Karev A.Ye., Shinkarev S.M., Korenkov I.P., Samoylov A.S., Stebel'kov V.A., Zhukov A.V., Izmet'yev K.M., Terent'yev S.G. Dispersity, Morphology and Elemental Composition of Aerosol Particles in the Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel. *Meditsinskaya Radiologiya* = Medical Radiology. 2020;3:59-65 (In Russ.). doi: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-59-65.
33. Samoylov A.S., Shandala N.K., Bushmanov A.YU., Shinkarev S.M., Dov'yanov A.G., Gantsovskiy P.P., Karev A.Ye., Kukhta G.A., Simakov A.V., Klochkov V.N. Assessment of Radiation Doses to Personnel of Complex Experimental Facilities at the Siberian Chemical Combine in the Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;6 (In Russ.).
34. Samoylov A.S., Metlyayev Ye.G., Lyaginskaya A.M., Galstyan I.A., Parinov O.V., Torubarov F.S., Karev A.Ye., Yermalitskiy A.P., Petoyan I.M., Voskal'chuk H.C., Kaverina T.N. *Zaklyucheniya o Sostoyanii Zabolevayemosti Rabotnikov Proizvodstva SNUP-Topлива po Rezul'tatam Provedennogo Sravnitel'nogo Analiza: Otchet o NIR «Razrabotka Vremennykh Rekomendatsiy po Provedeniyu Meditsinskikh Osmotrov Rabotnikov Proizvodstva SNUP-Topлива»* = Conclusion on the Morbidity Rate of Workers in the Production of SNP Fuel Based on the Results of the Comparative Analysis: Report on R&D "Development of Temporary Recommendations for Conducting Medical Examinations of Workers in the Production of SNP Fuel" under contract No. 11/13917D dated 01.10.2020. 56 p. (In Russ.).
35. *Plutoniyy. Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Plutonium. Radiation Safety. Ed. L.A.II'in Moscow, Izdat Publ., 2005. 415 p. (In Russ.).
36. *Tekhnogennoye Oblucheniye i Bezopasnost' Cheloveka* = Man-Made Radiation and Human Safety. Ed. L.A.II'in. Moscow, Izdat Publ., 2006. 303 p. (In Russ.).
37. Pomerantseva M.D., Ramayya L.K., Shevchenko V.A., Lyaginskaya A.M., Dement'yev S.I. Induction of Genetic Damage by Incorporated ²³⁸Pu in Germ Cells. *Radiobiologiya* = Radiobiology. 1987;27:206-209 (In Russ.).
38. Pomerantseva M.D., Ramaya L.K., Vilkinf G.A., Shevchenko V.A., Lyaginskaya A.M. Evaluation of the Genetic Effects of ²³⁸Pu Incorporated into Mice. *J. Mutation Res.* 1986;226:93-98.
39. Pomerantseva M.D., Ramayya L.K., Shevchenko V.A., Lyaginskaya A.M. Evaluation of Genetic Effects of ²³⁸Pu Intake in Mammals. *Genetika* = Genetics. 1988;24;4:176-181. (In Russ.).
40. *Nasledstvennost' Cheloveka i Okruzhayushchaya Sreda* = Human Heredity and the Environment. UNESCO Man and the Biosphere Programme. 1984. 199 p.
41. II'in L.A., Samoylov A.S., Tsov'yanov A.G., Shynkarev S.M., Shandala N.K., Gantsovskiy P.P., Karev A.Ye., Kukhta B.A., Simakov A.V., Klochkov V.N., Korenkov I.P., Lyaginskaya A.M., Parinov O.V., Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Tumanov K.A., Solomatin V.M., Izmet'yev K.M. Radiation and Hygienic Studies of the Experimental Production of Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel at JSC "SKhK". Part 2: Doses and Risks. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2022;67;1:39-45 (In Russ.). doi: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 20.02.2025. Принята к публикации: 25.03.2025.

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: 20.02.2025. Accepted for publication: 25.03.2025.