

ОНКОЛОГИЯ, ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ/ONCOLOGY, RADIATION THERAPY

DOI: <https://doi.org/10.62993/CMED.2025.4.3>

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В МЕДИЦИНЕ

Обзор

Арсеньев А.И.<sup>1,\*</sup>, Новиков С.Н.<sup>2</sup>, Арсеньев Е.А.<sup>3</sup>, Нефедов А.О.<sup>4</sup>, Тарков С.А.<sup>5</sup>, Новиков Р.В.<sup>6</sup>, Зозуля А.Ю.<sup>7</sup>,  
Мельник Ю.С.<sup>8</sup>, Антипов Ф.Е.<sup>9</sup>, Ильин Н.Д.<sup>10</sup>, Мережко Ю.О.<sup>11</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-3100-6451;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-7185-1967;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0003-2775-426X;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0001-6228-182X;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-5092-3733;

<sup>6</sup> ORCID : 0000-0003-1873-1293;

<sup>7</sup> ORCID : 0000-0003-0635-6967;

<sup>8</sup> ORCID : 0000-0002-3541-2764;

<sup>9</sup> ORCID : 0000-0002-8505-4977;

<sup>10</sup> ORCID : 0000-0001-6472-0427;

<sup>11</sup> ORCID : 0000-0003-1491-2644;

<sup>1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11</sup> Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н.Н. Петрова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (andrey.arseniev[at]mail.ru)

**Аннотация**

С XX века на глобальный радиационный фон существенное влияние оказывает техногенная деятельность человека. Из антропогенных источников ионизирующего излучения наиболее распространены медицинские – 95-98%, используемые с диагностическими и лечебными целями. Среди лиц, подвергающихся профессиональному облучению, медицинские работники составляют 75%.

Радиационная безопасность предполагает совокупность обоснованных практических и теоретических мер, направленных на обеспечение защиты ныне живущего населения и следующих поколений от негативного действия ионизирующего излучения.

В задачи обзора входило на основе анализа данных литературы, относящихся к актуальным проблемам радиационной безопасности, оценить некоторые ее проблемы, имеющие отношение к медицине.

Описываются область регулирования, методология, цель и основные принципы радиационной безопасности. Рассматриваются статистические, физические и радиобиологические аспекты предмета. Проводится анализ особенностей национального и международного регулирования в этой области. Показано, что радиационная безопасность подразумевает многоуровневую систему, обеспечивающую комплекс мер с всесторонним учетом вероятного вредоносного воздействия ионизирующего излучения на окружающую среду и людей. Отдельное внимание уделяется вопросам дозиметрии и радиационной защиты. Приводится критика некоторых вопросов нормативной базы. Проведенный анализ литературы и существующих нормативов позволил сделать заключение, что достижение необходимого уровня радиационной безопасности сотрудников, пациентов и населения обеспечивается неукоснительным контролем существующих регламентов и норм, безусловным соблюдением законодательно определенных требований к методам радиотерапии и лучевой диагностики, технологиям, дозиметрическому контролю, техническому оснащению и состоянию помещений.

**Ключевые слова:** радиационная безопасность, источники ионизирующего излучения, профессиональное облучение, вредные условия труда, дозиметрия.

**SOME PROBLEMS OF RADIATION SAFETY IN MEDICINE**

Review article

Arseniev A.I.<sup>1,\*</sup>, Novikov S.N.<sup>2</sup>, Arseniev E.A.<sup>3</sup>, Nefedov A.O.<sup>4</sup>, Tarkov S.A.<sup>5</sup>, Novikov R.V.<sup>6</sup>, Zozulya A.Y.<sup>7</sup>, Melnik Y.S.<sup>8</sup>,  
Antipov F.E.<sup>9</sup>, Ilyin N.D.<sup>10</sup>, Merezko Y.O.<sup>11</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-3100-6451;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0002-7185-1967;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0003-2775-426X;

<sup>4</sup> ORCID : 0000-0001-6228-182X;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-5092-3733;

<sup>6</sup> ORCID : 0000-0003-1873-1293;

<sup>7</sup> ORCID : 0000-0003-0635-6967;

<sup>8</sup> ORCID : 0000-0002-3541-2764;

<sup>9</sup> ORCID : 0000-0002-8505-4977;

<sup>10</sup> ORCID : 0000-0001-6472-0427;

<sup>11</sup> ORCID : 0000-0003-1491-2644;

1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 National Medical Research Center of Oncology named after N.N.Petrov, Saint-Petersburg, Russian Federation  
 4 Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (andrey.arseniev[at]mail.ru)

## Abstract

Since the twentieth century, man-made human activity has had a significant impact on the global radiation background. Of the anthropogenic sources of ionizing radiation, medical sources are the most common — 95-98%, used for diagnostic and therapeutic purposes. Among those exposed to occupational radiation, medical workers account for 75%.

Radiation safety implies a set of scientifically based theoretical and practical measures to ensure the protection of both people currently living and future generations from the harmful effects of ionizing radiation.

The purpose of the review was to evaluate some aspects of radiation safety related to medicine based on the analysis of literature data related to topical issues of radiation safety.

The scope of regulation, methodology, purpose and basic principles of radiation safety are described. The statistical, physical and radiobiological aspects of the subject are considered. The analysis of the peculiarities of national and international regulation in this area is carried out. It is shown that radiation safety implies a multi-level system that provides a set of measures taking into account all aspects of the likely harmful effects of ionizing radiation on the environment and people. Special attention is paid to the issues of dosimetry and radiation protection. Some issues of the regulatory framework are criticized. The statement is substantiated that ensuring the radiation safety of patients, staff and the public is achieved by accurate compliance with existing standards and regulations, strict observance of strict requirements for methods of radiation diagnostics and therapy, technologies, dosimetric control, technical equipment and condition of premises.

**Keywords:** radiation safety, sources of ionizing radiation, occupational exposure, harmful working conditions, dosimetry.

## Введение

Под ионизирующим излучением (ИИ) понимают потоки фотонов, или частиц, которые при контакте с веществом могут возбуждать их нейтральные атомы и молекулы. Источниками ИИ (ИИИ) являются естественные и искусственные радионуклиды (РН). Естественные РН могут быть терригенными (земными) и космогенными. Помимо этого, человечество с помощью ядерных реакторов создало более 40 не существующих в природе РН [1], [2], [3].

По терминологии МКРЗ (International Commission on Radiological Protection – ICRP – Международная Комиссия по Радиационной защите) различают три типа облучения:

1. Профессиональное – в результате производственной и научной деятельности.
2. Медицинское – в ходе диагностических и лечебных мероприятий.
3. Облучение населения – все прочие виды облучения.

Главным источником облучения человека является естественный радиационный фон. Внутреннее облучение радиоактивным газом радоном при дыхании обеспечивает самый весомый вклад из природных источников (51%). Космическое излучение минимально на поверхности земли, и возрастает по мере удаления от нее, приобретая важное значение в высокогорных регионах, авиации и при освоении космического пространства. Внешнее облучение связано с естественными радионуклидами, например, фосфатами лантаноидов (монацит), радием-226.

Многие исследователи полагают, то живые организмы адаптировались к естественному радиационному фону и серьезного вреда он не несет. В то же время другие считают его источником мутаций и негативных изменений. Национальный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) определил среднюю по миру дозу естественного ИИ в 2,4 мЗв/год [4], [5].

С XX века на глобальный радиационный фон существенное влияние оказывает техногенная деятельность человека (атомная энергетика, медицина, ядерные испытания, исследовательские проекты). Отмечено увеличение содержания в биосфере долгоживущих изотопов цезия-137 и стронция-90. В период активного испытания ядерного оружия вклад его последствий в природный фон достигал 7%, а Чернобыльская авария повысила уровень облучения населения до 50% от естественного фона.

Из антропогенных ИИИ наиболее распространены медицинские – 95-98%. Объем мирового рынка ядерной медицины превышает 80 млрд. долларов и непрерывно растет. Профессиональному облучению подвергаются 22,8 миллионов сотрудников. Из них на природные ИИИ приходится 13 миллионов, а на антропогенные – 9,8 миллионов человек. Наиболее часто профессиональному облучению подвергаются медицинские работники (75%) [6], [7], [8].

Контроль профессионального облучения осуществляется на трех уровнях:

- 1) уровень источника;
- 2) уровень окружающей среды;
- 3) уровень сотрудника.

Причём при использовании ИИ в медицинских целях контроль включен в диагностические и лечебные схемы, а не в алгоритмы радиационной защиты [2], [8].

Средняя индивидуальная годовая эффективная доза облучения населения России за счет всех источников ионизирующего излучения в 2022г. составила 4,21мЗв. Суммарная доза облучения на ≈78% связана с естественными ИИИ и на ≈22% с медицинскими. На долю всех остальных источников приходится 0,2%. Средняя доза природного облучения в 2022 г. составила 3,34 мЗв на одного жителя, из которых 1,98 мЗв за счет радона, а 0,86 мЗв за счет медицинского облучения, из которых 0,63 мЗв пришлось на проведение компьютерной томографии [9].

ИИ может быть непосредственным, обеспечивающимся заряженными частицами (электронами, протонами, α-частицами), и косвенным, за счет незаряженных частиц (нейтронов, фотонов), вызывающих ионизацию и/или ядерные превращения. ИИ имеет двойственную корпускулярно-волновую природу. Однако с определенными допущениями его можно разделить на фотонное и корпускулярное (α-и β-излучение, протоны, нейтроны и пр.) [2], [3], [8].

При воздействии ИИ на живые организмы возникает радиобиологический парадокс, заключающийся в несоразмерно высоком биологическом эффекте, даже при небольшой поглощенной энергии облучения [4], [10]. При этом последовательно реализуются 3 фазы ответа – физическая, химическая и биологическая. Существуют выраженные различия радиочувствительности как на эволюционном уровне (чем сложнее организован биологический объект, тем выше радиочувствительность), так и на популяционном. Популяционная радиочувствительность определяется генотипом, состоянием организма, полом и возрастом [11].

При тотальном облучении для высших организмов доза в 7-10Гр является летальной. В диапазоне доз 3-9Гр гибель облученного наступает на 7-15 сутки от нарушений кроветворения. При достижении 10-100Гр смерть фиксируется на 3-5 сутки, от поражений желудочно-кишечного тракта. При дозах радиации 200-1000Гр причиной гибели, как правило, служит поражение клеток центральной нервной системы [8], [12], [13].

Возникающие при воздействии ИИ радиобиологические эффекты описываются как мишенные, характерные для облученных тканей и немишенные – развивающиеся в клетках, непосредственно не подвергшихся действию радиации. Детерминированные мишенные эффекты определяются пороговой дозой в 0,25Зв, а вероятностные стохастические порога не имеют. Немишенные эффекты в основном реализуются как геномная нестабильность и эффект свидетеля (абскопальный). При ответе на ИИ запускается каскад биологических событий, включающий повреждение ДНК; разрушение сосудистого эндотелия; запуск иммунного ответа и подключение немишенных механизмов. Причем последовательность и вклад каждого из них дозозависимы, если при средних и низких дозах ведущим оказывается прямое цитотоксическое действие, то при высоких дозах на первый план выходят сосудистые и иммунные эффекты [10], [15].

Цель: на основе анализа данных литературы, относящихся к актуальным проблемам радиационной безопасности, оценить некоторые ее аспекты, имеющие отношение к медицине.

Материалы и методы: произведен поиск литературы в марте-ноябре 2024 года с использованием медицинских баз данных: Medline /PUBMED / Web of Science / Scopus / РИНЦ / Cochrane Library / EMBASE / Cyber Leninka / Global Health. Для неиндексированных журналов осуществлен избирательный вероятностный поиск.

### Результаты и обсуждение

Существует определенное Законом РФ от 05.03.1992г. №2446-1 понятие безопасности, как состояние защищенности жизненно важных интересов населения, государства и общества от внутренних и внешних угроз.

Радиационная безопасность (РБ) предполагает совокупность обоснованных научно практических и теоретических мер, направленных на обеспечение защиты ныне живущего населения и следующих поколений от негативного действия ИИ [1], [8], [16].

В область регулирования РБ включены:

- источники облучения (естественный фон, искусственные ИИИ);
- плановые и аварийные ситуации облучения;
- категории облучения (профессиональное, медицинское, население в целом).

Отдельно МКРЗ выделяется [17]:

- облучение медицинских целях (диагностика и лечение);
- непрофессиональное сознательное и добровольное облучение людей, занимающихся уходом за больными;
- добровольное облучение в научных целях.

Методология РБ заключается в разработке критериев оценки воздействия ИИ как вредоносного фактора на конкретного человека, популяцию и на объекты окружающей среды. Цель дисциплины – обеспечение охраны здоровья людей, в том числе профессионально связанных с антропогенными ИИИ; изучение, установление, определение и соблюдение норм и принципов применения радиации в науке, производстве и медицине [2], [8], [16].

В задачи предмета входит:

- снижение вреда, получаемого населением от ИИИ, как при плановом использовании, так и в аварийных ситуациях путем контроля и управления технологическими процессами и организацией деятельности;
- анализ радиобиологических данных о характере и результатах воздействия ИИ на биологические объекты;
- определение качественных и количественных взаимосвязей между эффектами и уровнями облучения;
- внедрение дозиметрических критериев оценки уровня ИИ;
- разработка систем радиационного контроля;
- законодательное утверждение основных допустимых пределов доз ИИ на основе полученных количественных данных (Норм Радиационной Безопасности – НРБ).

ИИ подразделяют на внешнее и внутреннее, в ряде случаев оперируют определением понятием вероятного потенциального облучения.

В РБ существует три базовых принципа [8], [18]:

1. Обоснования – всякое взаимодействие с ИИ, должно быть обосновано, а польза от него превышать вред.
2. Оптимизации – ограничение облучения разумно достижимым низким уровнем (настолько низко, насколько возможно - ALARA – as low as reasonable achievable).
3. Нормирования – соблюдение установленных предельных значений дозы (исключая медицинское облучение).

Перечисленные принципы используются только в комплексе и ни один из них не должен применяться самостоятельно. Основным, согласно формулировке МКРЗ, является принцип оптимизации.

Медицинская радиология включает в себя две основные медицинские дисциплины: лучевую диагностику и лучевую терапию, а принцип обоснования имеет особенности [2], [7], [8]:

- лучевая терапия (ЛТ) должна быть четко обоснована;
- польза и лечебный эффект должны быть выше отрицательных эффектов;
- отказ от ЛТ должен быть связан большим риском, чем ее использование.

При проектировании / эксплуатации помещений ЛТ и лучевой диагностики (ЛД) реализуются следующие требования:

- достижение лечебного и/или диагностического эффекта осуществляется с использованием доз облучения на минимально возможных уровнях;
- обеспечивается оптимальное снижение доз в нормальных тканях и органах риска;
- сводятся к минимуму дозы профессионального облучения персонала с учетом социально-экономических и технических факторов [1], [8], [16].

МАГАТЭ (международное агентство по атомной энергии – International Atomic Energy Agency – IAEA) в публикации № 103 от 2007г. к принципам обоснования, оптимизации и нормирования добавило принцип охраны окружающей среды [19].

Согласно рекомендациям МКРЗ, в нормах РБ (НРБ-99/2009) пределы доз для медицинского облучения отсутствуют, а при планировании и реализации методов ЛТ и ЛД основной акцент делается на эффективности, а не на уменьшении уровня облучения. Однако подчеркивается, что он быть минимально возможным.

МКРЗ рекомендован один набор принципов для всех ситуаций (планируемого, аварийного и реального облучения) с использованием понятия радиологической практики, и тремя уровнями обеспечения:

1. польза от использования в медицине ИИ превышает негативные последствия;
2. всякая манипуляция обосновывается определенной и обозначенной целью.
3. всякое лучевое воздействие определяется для конкретного пациента.

### **2.1. Международное регулирование в области РБ**

Основную роль в определении целей, задач и методологии РБ занимает МКРЗ [19]. Дополнительно в принятии решений участвуют такие международные сообщества, как: МКРЕ – Международная комиссия по радиологическим единицам и измерениям (International Commission on Radiation Units and Measurements – ICRU); НКДАР ООН – Научный комитет ООН по действию атомной радиации; МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии; ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения; АЯЭ/ОЭСР – Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития; МОТ – Международная организация труда; Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН; Международная Ассоциация по радиационной защите.

МАГАТЭ глобальную ядерную безопасность определяет, как совокупность мероприятий «S+S+S» (Safety + Security + Safeguards - Безопасность + Охрана + Предохранение). Под безопасностью понимают РБ, готовность к радиационным авариям и реагирование на них. Охрана заключается в защите информации, учете, контроле, физической защите ИИИ, объектов и радиационных отходов. Предохранение подразумевает нераспространение ИИИ. Эталонными являются Стандарты Международной радиационной безопасности (BSS – International Radiation Basic Safety Standards), принятые в 2011 году [12], [16], [20].

МАГАТЭ организовало консультативную группу, состоящую из независимых экспертов – лучевых терапевтов и медицинских физиков, для разработки руководства в отношении инициирования, выполнения и представления отчетов (Quality Improvement Quality Assurance Team for Radiation Oncology – QUATRO – Группа Аудита Обеспечения Качества в радиационной онкологии). Аудит охватывает такие аспекты, как радиационная онкология, медицинская физика и технология лучевой терапии. Интерпретация результатов аудита выполняется по соответствующим критериям (стандартам качества) надлежащей практики ЛТ [21], [22], [23].

### **2.2. Национальная нормативная база РБ в Российской Федерации**

Контроль и надзор за РБ населения, персонала и объектов осуществляется органами государственного регулирования. К ним относятся:

- 1) правительство России;
- 2) министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий;
- 3) министерство здравоохранения. Конкретные предметные решения принимаются в ряде Федеральных служб (Ростехнадзор, Роспотребнадзор, ФМБА – Федеральное Медико-биологическое Агентство).

В сфере взаимодействия населения с ИИ правовое регулирование осуществляется Федеральным законом (ФЗ) «О радиационной безопасности населения» № 3-ФЗ от 09.01.1996г. (с изменениями в редакциях от 22.08.2004 № 122-ФЗ; от 23.07.2008 № 160-ФЗ; от 18.07.2011 № 242-ФЗ; от 19.07.2011 № 248-ФЗ; от 08.12.2020 № 429-ФЗ; от 11.06.2021 № 170-ФЗ и от 18.03.2023 № 67-ФЗ) и ФЗ № 52-ФЗ от 30.03.1999г. «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения».

Эти нормативно-правовые акты констатируют, что организации и учреждения, производственный цикл подразумевает работу с ИИИ должны проводить всесторонние мероприятия, обеспечивающие РБ персонала, объекта и расположенного поблизости населения.

ФЗ «О радиационной безопасности населения» №3-ФЗ (09.01.1996г.) является системным и самодостаточным. Он определяет принципы обеспечения РБ; полномочия РФ и ее субъектов; внедряет государственное управление, надзор и контроль за обеспечением РБ; декларирует требования к РБ в нормальном режиме и при радиационной аварии; обозначает права, обязанности и ответственность за нарушение норм РБ [1], [8], [16].

Дополнительно постановлениями Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009г. № 47 утверждены «Нормы радиационной безопасности» (НРБ99/2009) и Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.6.1.2523 – 09), требования к производственной деятельности объектов детализированы в постановлении от 26.04.2010г. №40 «Об утверждении СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности – ОСПОРБ 99/2010». Обозначенные нормы распространяются на следующие ИИИ:

- а) естественные;
- б) медицинские;
- в) техногенные в нормальном режиме;

г) техногенные при РА.

Требования не распространяются на ИИИ: если индивидуальная эффективная доза за год не превышает 10 мкЗв; если коллективная доза за год менее 1 чел. – Зв; если коллективная доза по принципу оптимизации не требует снижения; если индивидуальная эквивалентная доза не превышает в коже 50 мЗв, а в хрусталике 15 мЗв.

### 2.3. Нормальный радиационный уровень

Согласно рекомендациям МКРЗ, с учетом эффекта экранирования нормальным считается радиационный уровень, соответствующий естественному фону 0,1-0,2 мкЗв/ч, допустимым – 0,2-0,6 мкЗв/ч, а повышенным – более 0,6-1,2 мкЗв/ч.

Суммарная доза от всех видов ИИ (предел индивидуального пожизненного риска) для техногенного облучения сотрудников за год составляет  $\approx 10^{-3}$ , а населения  $\approx 5 \times 10^{-5}$  [1], [2], [3]. В России и странах ЕС предел дозы профессионального облучения составляет 20 мЗв/год. В США и Китае придерживаются норматива 50 мЗв/год. По оценкам экспертов США стоимость спасенной жизни за счет уровня РБ в 5000 раз ниже стоимости спасенной жизни за счет уровня здравоохранения [16].

### 2.4. Профессиональное облучение

Законодательно обозначено несколько категорий облучаемых лиц:

1. Взаимодействующий с ИИИ персонал.

- Сотрудники, напрямую работающие с потенциально опасными ИИИ – группа А.

- Сотрудники, непосредственно не работающие с ИИИ, но находящиеся в зоне их воздействия – группа Б.

2. Население.

Для каждой категории определены нормативы трех классов [3], [6], [8]:

1) основные пределы доз;

2) уровни допустимого монофакторного воздействия;

3) контрольные уровни с учетом состояния РБ в организации уровня РБ.

Пределы доз не распространяются на естественное и медицинское облучение и на последствия РА, для которых оговариваются особые ограничения. Для сотрудников эффективная доза облучения за все время деятельности ( $\approx 50$  лет) должна быть менее 1000 мЗв. Для населения в целом за всю жизнь ( $\approx 70$  лет) этот показатель не должен превышать 70 мЗв. У женщин до 45 лет при работе с ИИИ, на нижней части живота эквивалентная доза должна быть менее 1 мЗв в месяц, тогда при несвоевременно выявленной беременности облучение плода не превысит 1 мЗв за 2 мес. В случае беременности женщин переводят на работу, не связанную с ИИИ. Для обучающихся при контакте с ИИИ годовые дозы должны находиться в пределах, установленных для группы Б.

РБ подразумевает многоуровневую систему, обеспечивающую комплекс мер с учетом всех аспектов возможного негативного воздействия ИИ на персонал, население и окружающую среду. Контроль и организацию РБ обеспечивают прошедшие специализированное обучение сотрудники.

Комплекс мер, направленных на обеспечение РБ обеспечивается следующими мерами:

- безусловное выполнение требований к технологиям эксплуатации ИИИ, включая проектное зонирование территории и физическую защиту объектов;

- действующая система дозиметрического контроля всех зон, контроль технологий и материалов;

- подготовка персонала для работы с ИИИ согласно действующим нормативам с учетом ограничений допуска;

- неукоснительное соблюдение техники безопасности;

- обучение и переподготовка персонала;

- подготовка и обновление системы радиационной защиты.

Известно, что доза, полученная от ИИИ, прямо пропорциональна времени воздействия и обратно пропорциональна квадрату расстояния. Соответственно, защита от внешнего облучения определяется тремя факторами:

1) временем;

2) расстоянием;

3) экранированием.

Последний фактор с использованием защитных барьеров считается самым надежным [23], [24]. Проникающая способность ИИ различается в зависимости от вида в порядке их обозначения –  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Альфа-частицы останавливаются самыми минимальными барьерами, в том числе наружным слоем кожи, а опасность от него возникает при попадании в организм. Проникающая способность  $\beta$ -излучения выше и дополняется возникновением вторичного тормозного ИИ, определяемого атомным номером материала. Защитные экраны от  $\beta$ -излучения производятся из веществ с малым атомным номером, например, алюминия, или органического стекла. Гамма-излучение полностью остановить невозможно, поскольку оно распространяется экспоненциально. Экранируется оно веществами с высоким атомным номером, например, свинцом, а адекватность защиты определяют снижением ИИ до фоновых величин. При нейтронном излучении возникает упругое рассеяние с передачей ядру атома кинетической энергии без последующей реакции. В связи с этим для комплексной защиты от него сначала используется замедление содержащими водород материалами с малой атомной массой (парафин, вода, бетон), а в защитные экраны добавляют бор-10, поскольку при захвате нейтрона ядром бора образуется  $\alpha$ -частица с низкой проникающей способностью [2], [4], [8].

### 2.5. Ответственность за нарушение законодательства

Нарушение требований РБ установленных законом, приводящие к превышению пределов допустимых доз ИИ являются основанием для административной (ст. 6.3-6.7 кодекса об административных правонарушениях) и/или уголовной (ст. 236 УК РФ) ответственности. В зависимости от тяжести последствий к организации могут

применяться штрафные санкции и приостановка/прекращение деятельности, а при причинении существенного вреда здоровью и смерти пострадавших виновные могут быть лишены свободы сроком до 5 лет.

Вредные условия труда определяется приказом Министерства труда и социальной защиты РФ (№ 817н от 21.11.2023г.) «Об утверждении методики проведения специальной оценки условий труда». При работе с ИИИ вредные условия определяются соблюдением / неперевышением гигиенических нормативов, установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 НРБ-99/2009, а степень вредности / опасности связана с увеличением риска возникновения стохастических эффектов. В качестве гигиенического критерия используется максимальная потенциальная эквивалентная доза излучения (МПД), рассчитанная за год при работе в обычных условиях на определенном рабочем месте. При расчёте МПД учитывается показатель амбиентной дозы. Это эквивалент дозы, создаваемый в шаре диаметром 30см из эквивалентной ткани вещества ( $1\text{г}/\text{см}^3$ ) на 10 мм по радиусу, параллельному направлению потока, противоположно направленному, в аналогичном по энергетическому распределению, составу, флюенсу мононаправленном и однородном поле. РМГ 78-2005 (рекомендации по межгосударственной стандартизации) определяют мощность амбиентного эквивалента дозы как отношение приращения дозы за интервал времени к его величине [6], [16], [25].

Облучение сотрудников группы А сверх зафиксированных пределов доз при РА допустимо лишь при необходимости предотвращения пагубного влияния радиации на людей. Обычно к таким работам добровольно привлекаются мужчины старше 30 лет. При ожидаемой эффективной годовой дозе до 100мЗв, необходимо разрешение территориальных органов Госсанэпиднадзора, а до 200мЗв – федеральных. Если дозы облучения в группе Б превышают 5мЗв/год – осуществляются мероприятия для их снижения, вплоть до прекращения деятельности, при невозможности сотрудники переводятся в группу А [7], [8], [25].

## 2.6. Критика нормативов

В публикации Федорец А.Г. (2015) высказывается мнение, что действующие нормативы имеют ряд методологических противоречий. Так, он считает, что концепция приемлемого риска и ее основополагающие принципы для РБ не согласуются с существующей в РФ концепцией гигиенического нормирования, основанной на строгом лимитировании уровней без учета организационных, технических и социально-экономических факторов. Имеющиеся ограничения основаны на принципах пороговой абсолютной безопасности и зафиксированы в законах (ФЗ от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», ФЗ от 28.12.2013 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» – СОУТ). Противоречия между рискованной и пороговой оценками приводят к методическим противоречиям при СОУТ и аттестации рабочих мест по фактору ИИ. В публикации констатируется, что действующие документы позволяют по фактору ИИ устанавливать вредные условия труда даже при допустимых значениях гигиенических нормативов и дают право работнику на повышение оплаты по факту работы с источниками ИИ независимо от установленного класса для условий труда. В СанПиН 2.6.1.2523-09 констатируются санитарно-эпидемиологические требования к безопасности среды обитания, но не определяются гигиенические нормативы, соответствующие Ф3-52. Автор считает, что МПД отражает предельно допустимый уровень риска, а не объективно возможную величину реальной дозы облучения и предполагает возможность определять вредные условия труда при соблюдении допустимых пределов индивидуальных доз. При определении класса условий труда, вероятно, следует учитывать возможную МПД за год на основе систематических данных радиационного контроля локальным нормативным актом работодателя для данного вида деятельности [25].

В своей публикации Наркевич Б.Я. (2021) предлагает внести некоторые изменения в НРБ. Автор считает, что необходимо включить в текст глоссарий терминов, соответствующих рекомендациям МАГАТЭ, для предотвращения противоречий в федеральных и ведомственных нормативных актах. Далее, он предлагает исключить разделение персонала на группы А и Б, поскольку оно отсутствует в документах МАГАТЭ и МКРЗ. Так, в публикации МКРЗ №103, весь медицинский персонал, работающий с ИИ, независимо от того управляет он источниками, или находится в сфере воздействия поля, относится к лицам подвергающимся профессиональному облучению. Соответственно, более целесообразно классифицировать не персонал, а зоны деятельности (контроля и наблюдения). И наконец, автор предлагает, согласно предложениям МКРЗ, понизить для профессионального облучения предел эквивалентной дозы хрусталика до 20мЗв в год, вместо существующей нормы в 150мЗв [2], [7].

## 2.7. Дозы и дозиметрия

Характеристики излучения в количественном отношении описываются:

- 1) активностью;
- 2) линейной передачей энергии;
- 3) поглощенной дозой (взаимодействие излучения с веществом).

Поглощенная доза определяется величиной энергии ИИ, переданной веществу, как отношение средней энергии, поглощенной в элементарном объеме среды, к массе объема. Измеряется в Дж/кг и обозначается единицей Грей (СИ; 1Гр равен 1Дж/1кг). Реже используют внесистемную единицу рад (radiation absorbed dose).

Экспозиционная доза - это отношение полного количества ионов одного знака, образующихся в элементарном объеме воздуха, к массе объема. Измеряется в Кл/кг (СИ), или рентгенах (внесистемная единица) [26].

Биологические эффекты при идентичных поглощенных дозах различных видов ИИ существенно отличаются. Для их описания используется понятие эквивалентной дозы, учитывающей радиочувствительность. Она представляет собой произведение средней поглощенной дозы с весовым безразмерным фактором и является дозой любого ИИ, приводящей к биологическим эффектам, аналогичным возникающим при воздействии рентгеновского или  $\gamma$ -излучения в 1Гр. Измеряется в зивертах (Зв – СИ), иногда используется внесистемная единица бэр. Весовой фактор для  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения равен 1; для протонов (2МэВ) – 2; для  $\alpha$ -частиц и тяжелых ионов – 20; для нейтронов (>10кэВ и <20МэВ) – 5; для нейтронов (10-100кэВ и 2-20МэВ) – 10; для нейтронов (100кэВ-2МэВ) – 20 [6], [8], [26].

Индивидуальная эквивалентная и эффективная дозы определяют риск развития негативных последствий ИИ для отдельного человека. Для описания группового совокупного эффекта воздействия ИИ применяется коллективная

эквивалентная доза, получаемая сложением эквивалентных индивидуальных доз за оговоренный интервал времени, измеряемый в чел.-Зв (СИ), или в чел.-бэр (внесистемно). В зависимости от объема вовлеченных людей коллективные дозы могут быть популяционными, региональными и глобальными (для всего населения), они позволяют использовать адекватные статистические методы для определения значимых различий в отношении негативных последствий в группах. Под полной (ожидаемой) понимается коллективная доза, полученная всем поколением человечества, используемая для оценки совокупного вреда при оценке целесообразности использования радиационных технологий. Индивидуальные характеристики биологических объектов определяют оценочный характер коллективных доз.

### 2.8. Дозиметрия

В задачи дозиметрии входит количественная оценка предполагаемого эффекта ИИ на биологические объекты. В практическом отношении измерить эквивалентную и эффективную дозы невозможно. Для определения нормируемых показателей проводятся различной сложности расчеты.

Дозиметрический анализ предполагает:

- а) измерение активности ИИ;
- б) определение качества и количества ИИ (поля);
- в) определение величины и распределения энергии, поглощенной в любом объекте, находящемся в зоне ИИ.

Радиационный контроль доз при наружном облучении осуществляется с использованием дозиметров для измерения операционных величин.

Если нормируемые величины являются расчетными и не подлежат практическому измерению, то операционные величины измеримы. В настоящее время они стандартизованы международными консенсусами (МКРЕ, МКРЗ) с внедрением понятий индивидуального, направленного и амбиентного эквивалентов. Индивидуальный эквивалент определяется персональной дозиметрией, а направленный и амбиентный при групповом дозиметрическом контроле и мониторинге окружающей среды, включая проектные и запроектные аварии. Для измерения операционных величин производится калибровка дозиметрических устройств на фантомах, располагаемых в поле ИИ [3], [6], [23].

При радиационном контроле доз внутреннего облучения операционные величины не используют, а эффективные дозы рассчитывают на основе количества поступившей в организм активности. РН с  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучением оценивают счетчиками, а для  $\alpha$ -излучающих РН выполняют отбор биологических проб. Полученная доза при этом определяется физическими характеристиками РН (период полураспада, тип и энергия) и биологическими факторами (период полувыведения, особенности распределения) [1], [7], [14].

### 2.9. Приборы контроля и измерения радиоактивных излучений

Оборудование для измерения ИИ в функциональном отношении может быть трех основных видов:

1. Дозиметры, измеряющие поглощенные и экспозиционные дозы и их мощности, перенос/ передачу энергии, интенсивность.
2. Радиометры для оценки активности ИИИ.
3. Спектрометры, измеряющие распределения ИИ (радиоизотопный состав, энергия).

Процесс регистрации обеспечивается воздействием ИИ на детектор дозиметра, с использованием различных принципов: ионизационного; химического; сцинтилляционного; полупроводникового; люминесцентного; трекового; фотографического; активационного; теплового [27].

Радиационная безопасность в медицине имеет особенности, поскольку осуществляется преднамеренное облучение больных в диагностических и лечебных целях, соответственно требуется управление дозами, соизмеримое с поставленными целями – получения необходимого изображения, или терапевтического эффекта [8], [28].

Обеспечение РБ при осуществлении ЛД и ЛТ является сферой ответственности администрации учреждения. Компетентные лица формируют официально утвержденную нормативную базу по РБ, в которой определяется порядок работ, детально описываются требования к хранению, учету, радиационному контролю, порядку выдачи ИИИ, технологиям, гигиеническим особенностям и действиям персонала при РА [2], [7], [8].

Потенциальная радиационная опасность подразделений ЛД и ЛТ, согласно действующей классификации, уже на этапе проекта относит их к III-IV. Использование ИИИ возможно только при наличии лицензии и санитарно-эпидемиологических разрешений. Все технологии ЛД и ЛТ, импользуемые на практике утверждаются Росздравом (клинические рекомендации, стандарты оказания медицинской помощи). Устанавливаются оптимальные контрольные уровни облучения при проведении ЛТ [1], [8].

Все этапы создания подразделений ЛД и ЛТ (проект, строительство, производство, монтаж, сервисные, наладочные и ремонтные работы) производятся лицензированными. Проводится непрерывный и всесторонний мониторинг всей совокупности критериев, определяющих воздействие ИИ на больных, сотрудников и население в зоне контроля в рамках мероприятий санитарно-эпидемиологического надзора. Инструкция по РБ предусматривает план мероприятий по защите больных от последствий аварийных ситуаций, предполагающий безотлагательную эвакуацию пациента, оценку полученной незапланированной дозы облучения, общего состояния и принятие мер предупреждения лучевых повреждений [2], [7], [8].

### Заключение

Таким образом, предмет РБ предполагает совокупность обоснованных практических и теоретических мер, обоснованных научно и направленных на обеспечение защиты ныне живущего населения и следующих поколений от негативного действия ИИ.

При использовании ИИ в медицине эффект от него и польза должны превосходить негативные последствия облучения, а риск отказа от лучевой диагностики и радиотерапии должен превышать риск от их проведения.

Система РБ основана на трех основных принципах – обоснования, оптимизации и нормирования. Достижение необходимого уровня РБ сотрудников, пациентов и населения обеспечивается неукоснительным контролем существующих регламентов и норм, безусловным соблюдением законодательно определенных требований к методам

радиотерапии и лучевой диагностики, технологиям, дозиметрическому контролю, техническому оснащению и состоянию помещений.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Ахматдинов Р.Р. Разработка автоматизированной системы оценки радиационных рисков населения Российской Федерации по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий / Р.Р. Ахматдинов, А.М. Библин, Л.В. Репин // Радиационная гигиена. — 2021. — № 14 (4). — С. 114–121.
2. Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение I. Актуальные проблемы / Б.Я. Наркевич // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2021. — № 66 (1). — С. 29–36.
3. Панкина Е.Б. Анализ природных и техногенных факторов, формирующих мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного излучения на территории ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» / Е.Б. Панкина, М.П. Глухова // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. — 2019. — № 4 (18). — С. 50–65.
4. Beyzadeoglu M. Basic Radiation Oncology / M. Beyzadeoglu, G. Ozyigit, C. Ebruli // Springer. — Berlin, 2020. — 575 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-11666-7.
5. Bray F. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries / F. Bray, M. Laversanne, H. Sung [et al.] // CA Cancer J Clin. — 2024. — № 74 (3). — P. 229–263. — DOI: 10.3322/caac.21834. — PMID: 38572751.
6. Банников С.Н. Электронный учебно-методический комплекс. Защита населения и объектов от чрезвычайных ситуаций. Радиационная безопасность / С.Н. Банников, Д.И. Шипица, Т.М. Архангельская [и др.]. — Белорусский национальный технический университет, 2020. — 342 с.
7. Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение II. Нормативная документация / Б.Я. Наркевич // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2021. — № 66 (6). — С. 18–25.
8. Черняев А.П. Радиационная безопасность / А.П. Черняев, М.В. Желтоножская, С.М. Варзарь. — Москва: ООП физического факультета МГУ, 2019. — 98 с.
9. Barkovsky A.N. Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022 / A.N. Barkovsky, R.R. Akhmatdinov, R.R. Akhmatdinov [et al.]. — DOI: 10.13140/RG.2.2.23526.19521.
10. Арсеньев А.И. Радиобиология высокодозной стереотаксической лучевой терапии / А.И. Арсеньев, С.Н. Новиков, С.В. Канаев [и др.] // Профилактическая и клиническая медицина. — 2022. — № 3 (84). — С. 42–50. — DOI:10.47843/2074-9120\_2022\_3\_42.
11. Joiner M.C. Basic Clinical Radiobiology / M.C. Joiner, A.J. Kogel. — Taylor & Francis Group, 2018. — 360 p. — DOI: 10.1201/9780429490606.
12. Clement C.H. Recovery after nuclear accidents / C.H. Clement // Ann ICRP. — 2021. — № 50(1\_suppl). — P. 5–7. — DOI: 10.1177/01466453211020845. — PMID: 34143693.
13. DOE Openness: Human Radiation Experiments: Roadmap to the Project: Experiments List / Office of Environment, Health, Safety and Security (EHSS). U.S. Department of Energy. — 2024.
14. Foster C.R.M. Emergency preparedness: Ionising radiation incidents and medical management / C.R.M. Foster // BMJ Mil Health. — 2020. — № 166 (1). — P. 21–28. — DOI: 10.1136/jramc-2018-000958. — PMID: 29982191.
15. Bazyka D.A. Classification of medical equipment for anti-radiation protection / D.A. Bazyka, O.O. Lytvynenko // Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. — 2022. — № 27. — P. 84–106. — DOI: 10.33145/2304-8336-2022-27-84-106.
16. Селиваникова О.В. Ядерная и радиационная безопасность / О.В. Селиваникова // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SELOV/academic/Tab13/Лекция%201.pdf> (дата обращения: 09.02.2025).
17. ICRP Publication 105. Radiation protection in medicine // Ann ICRP. — 2007. — № 37 (6). — P. 1–63. — DOI: 10.1016/j.icrp.2008.08.001. — PMID: 18762065.
18. IAEA annual report 2023. Article VI.J of the Agency’s Statute requires the Board of Governors to submit “an annual report to the General Conference concerning the affairs of the Agency and any projects approved by the Agency”. This report covers the period 1 January to 31 December 2023. — 130 p. — URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-2.pdf> (accessed: 09.02.2025).
19. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Ann ICRP. — 2007. — № 37 (2-4). — P. 1–332. — DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003. — PMID: 18082557.
20. Morgan T.L. The Radiation Safety Officer as an Advocate for Patient Safety / T.L. Morgan // Health Phys. — 2020. — № 118 (1). — P. 75–78. — DOI: 10.1097/HP.0000000000001128. — PMID: 31318731.
21. Izewska J. Improving the quality of radiation oncology: 10years' experience of QUATRO audits in the IAEA Europe Region / J. Izewska, M. Coffey, P. Scalliet [et al.] // Radiother Oncol. — 2018. — № 126 (2). — P. 183–190. — DOI: 10.1016/j.radonc.2017.09.011. — PMID: 28988660.

22. Comprehensive audits of radiation therapy practice: a means to improve quality. The Quality Assurance Audit Group in Radiation Oncology (QUATRO). The IAEA. — Vienna, 2008.
23. Lebaron-Jacobs L. Basic concepts of radiation emergency medicine / L. Lebaron-Jacobs, E. Herrera-Reyes // *J Radiol Prot.* — 2021. — № 41 (4). — DOI: 10.1088/1361-6498/ac270e. — PMID: 34525459.
24. Thorne M.C. Responding to radiation accidents: what more do we need to know? / M.C. Thorne // *J Radiol Prot.* — 2022. — № 42 (3). — DOI: 10.1088/1361-6498/ac8c4c. — PMID: 36001944.
25. Федорец А.Г. О совершенствовании методики оценки условий труда по фактору ионизирующего излучения / А.Г. Федорец // *Медицинская физика.* — 2015. — № 4 (68). — С. 98–108.
26. Маркитанова Л.И. Защита от радиации / Л.И. Маркитанова. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. — 39 с.
27. Антонович Д.А. Радиационная безопасность / Д.А. Антонович, В.Г. Залесский. — Новополюцк: ПГУ, 2004. — 168 с.
28. Ushakov I.B. Pharmacological protection in deep space: a modern view / I.B. Ushakov, M.V. Vasyun // *Radiation Biology. Radioecology.* — 2019. — № 59 (2). — P. 150–160.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Akhmatdinov R.R. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy ocenki radiacionnyh riskov naselenija Rossijskoj Federacii po dannym radiacionno-gigienicheskoj pasportizacii territorij [Development of an automated system for assessing radiation risks of the population of the Russian Federation according to radiation and hygienic certification of territories] / R.R. Akhmatdinov, A.M. Biblin, L.V. Repin // *Radiacionnaja gigiena [Radiation hygiene].* — 2021. — № 14 (4). — P. 114–121. [in Russian]
2. Narkevich B.Ja. Radiacionnaja bezopasnost' v jadernoj medicine: soobshhenie I. Aktual'nye problemy [Radiation safety in nuclear medicine: message I. Current problems] / B.Ja. Narkevich // *Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost' [Medical radiology and radiation safety].* — 2021. — № 66 (1). — P. 29–36. [in Russian]
3. Pankina E.B. Analiz prirodnyh i tehnogennyh faktorov, formirujushhij moshhnost' ambientnogo jekvivalenta dozy fotonnogo izlucheniya na territorii FGUP "NITI im. A.P. Aleksandrova" [Analysis of natural and man-made factors forming the power of the ambient equivalent of the photon radiation dose on the territory of FSUE "A.P. Alexandrov NITI"] / E.B. Pankina, M.P. Gluhova // *Tehnologii obespechenija zhiznennogo cikla JaJeU [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants].* — 2019. — № 4 (18). — P. 50–65. [in Russian]
4. Beyzadeoglu M. Basic Radiation Oncology / M. Beyzadeoglu, G. Ozyigit, C. Ebruli // Springer. — Berlin, 2020. — 575 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-11666-7.
5. Bray F. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries / F. Bray, M. Laversanne, H. Sung [et al.] // *CA Cancer J Clin.* — 2024. — № 74 (3). — P. 229–263. — DOI: 10.3322/caac.21834. — PMID: 38572751.
6. Bannikov S.N. Jelektronnyj uchebno-metodicheskij kompleks. Zashhita naselenija i ob'ektov ot chrezvychajnyh situacij. Radiacionnaja bezopasnost' [Electronic educational and methodical complex. Protection of the population and facilities from emergency situations. Radiation safety] / S.N. Bannikov, D.I. Shipica, T.M. Arhangel'skaja [et al.]. — Belarusian National Technical University, 2020. — 342 p. [in Russian]
7. Narkevich B.Ja. Radiacionnaja bezopasnost' v jadernoj medicine: soobshhenie II. Normativnaja dokumentacija [Radiation safety in nuclear medicine: message II. Regulatory documentation] / B.Ja. Narkevich // *Medicinskaja radiologija i radiacionnaja bezopasnost' [Medical radiology and radiation safety].* — 2021. — № 66 (6). — P. 18–25. [in Russian]
8. Chernyaev A.P. Radiacionnaja bezopasnost' [Radiation safety] / A.P. Chernyaev, M.V. Zheltonozhskaja, S.M. Varzar'. — Moscow: PLO of the MSU Department of Physics, 2019. — 98 p. [in Russian]
9. Barkovsky A.N. Guide: Radiation situation on the territory of the Russian Federation in 2022 / A.N. Barkovsky, R.R. Akhmatdinov, R.R. Akhmatdinov [et al.]. — DOI: 10.13140/RG.2.2.23526.19521.
10. Arsen'ev A.I. Radiobiologija vysokodoznoj stereotaksicheskoy luchevoj terapii [Radiobiology of high-dose stereotactic radiation therapy] / A.I. Arsen'ev, S.N. Novikov, S.V. Kanaev [et al.] // *Profilakticheskaja i klinicheskaja medicina [Preventive and clinical medicine].* — 2022. — № 3 (84). — P. 42–50. — DOI: 10.47843/2074-9120\_2022\_3\_42. [in Russian]
11. Joiner M.C. Basic Clinical Radiobiology / M.C. Joiner, A.J. Kogel. — Taylor & Francis Group, 2018. — 360 p. — DOI: 10.1201/9780429490606.
12. Clement C.H. Recovery after nuclear accidents / C.H. Clement // *Ann ICRP.* — 2021. — № 50(1\_suppl). — P. 5–7. — DOI: 10.1177/01466453211020845. — PMID: 34143693.
13. DOE Openness: Human Radiation Experiments: Roadmap to the Project: Experiments List / Office of Environment, Health, Safety and Security (EHSS). U.S. Department of Energy. — 2024.
14. Foster C.R.M. Emergency preparedness: Ionising radiation incidents and medical management / C.R.M. Foster // *BMJ Mil Health.* — 2020. — № 166 (1). — P. 21–28. — DOI: 10.1136/jramc-2018-000958. — PMID: 29982191.
15. Bazyka D.A. Classification of medical equipment for anti-radiation protection / D.A. Bazyka, O.O. Lytvynenko // *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology.* — 2022. — № 27. — P. 84–106. — DOI: 10.33145/2304-8336-2022-27-84-106.
16. Selivanikova O.V. Jadernaja i radiacionnaja bezopasnost' [Nuclear and radiation safety] / O.V. Selivanikova // *Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet [National Research Tomsk Polytechnic University].* — URL: <https://portal.tpu.ru/SHARED/s/SELOV/academic/Tab13/Lekcija%201.pdf> (accessed: 09.02.2025). [in Russian]
17. ICRP Publication 105. Radiation protection in medicine // *Ann ICRP.* — 2007. — № 37 (6). — P. 1–63. — DOI: 10.1016/j.icrp.2008.08.001. — PMID: 18762065.

18. IAEA annual report 2023. Article VI.J of the Agency's Statute requires the Board of Governors to submit "an annual report to the General Conference concerning the affairs of the Agency and any projects approved by the Agency". This report covers the period 1 January to 31 December 2023. — 130 p. — URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-2.pdf> (accessed: 09.02.2025).
19. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // Ann ICRP. — 2007. — № 37 (2-4). — P. 1–332. — DOI: 10.1016/j.icrp.2007.10.003. — PMID: 18082557.
20. Morgan T.L. The Radiation Safety Officer as an Advocate for Patient Safety / T.L. Morgan // Health Phys. — 2020. — № 118 (1). — P. 75–78. — DOI: 10.1097/HP.0000000000001128. — PMID: 31318731.
21. Izewska J. Improving the quality of radiation oncology: 10years' experience of QUATRO audits in the IAEA Europe Region / J. Izewska, M. Coffey, P. Scalliet [et al.] // Radiother Oncol. — 2018. — № 126 (2). — P. 183–190. — DOI: 10.1016/j.radonc.2017.09.011. — PMID: 28988660.
22. Comprehensive audits of radiation therapy practice: a means to improve quality. The Quality Assurance Audit Group in Radiation Oncology (QUATRO). The IAEA. — Vienna, 2008.
23. Lebaron-Jacobs L. Basic concepts of radiation emergency medicine / L. Lebaron-Jacobs, E. Herrera-Reyes // J Radiol Prot. — 2021. — № 41 (4). — DOI: 10.1088/1361-6498/ac270e. — PMID: 34525459.
24. Thorne M.C. Responding to radiation accidents: what more do we need to know? / M.C. Thorne // J Radiol Prot. — 2022. — № 42 (3). — DOI: 10.1088/1361-6498/ac8c4c. — PMID: 36001944.
25. Fedorec A.G. O sovershenstvovanii metodiki ocenki uslovij truda po faktoru ionizirujushhego izluchenija [On improving the methodology for assessing working conditions based on the ionizing radiation factor] / A.G. Fedorec // Medicinskaja fizika [Medical physics]. — 2015. — № 4 (68). — P. 98–108. [in Russian]
26. Markitanova L.I. Zashhita ot radiacii [Protection from radiation] / L.I. Markitanova. — Saint-Petersburg: ITMO University, 2015. — 39 p. [in Russian]
27. Antonovich D.A. Radiacionnaja bezopasnost' [Radiation safety] / D.A. Antonovich, V.G. Zalesskij. — Novopolock: PGU, 2004. — 168 p. [in Russian]
28. Ushakov I.B. Pharmacological protection in deep space: a modern view / I.B. Ushakov, M.V. Vasyn // Radiation Biology. Radioecology. — 2019. — № 59 (2). — P. 150–160.