

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

А. Л. Еремин¹✉, Н. М. Богатов¹, Н. Е. Бей¹, В. А. Баранов², А. В. Кленевский³, Т. С. Дахужев⁴¹ Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия² Управление Роспотребнадзора по Краснодарскому краю, Краснодар, Россия³ Клинический онкологический диспансер № 1, Краснодар, Россия⁴ Адыгейский республиканский клинический онкологический диспансер имени М. Х. Ашхамафа, Майкоп, Россия

Технологии на основе ионизирующих излучений (ИИ) проникли во многие сферы человеческой деятельности — от атомной энергетики и оборонных комплексов до медицинской диагностики и терапии, что делает проблему гигиенической оценки воздействия ИИ междисциплинарной и сохраняющей высокую научно-практическую значимость. Целью работы было проанализировать проблемы и подходы к верифицированной оценке влияния «доза–эффект» физического фактора ИИ для обоснования целесообразности унификации на современном этапе норм радиационной безопасности (НРБ) и императива доказательной и профилактической медицины. Проанализированы публикации НРБ МАГАТЭ и СанПиН, дозы по клиническим рекомендациям Минздрава России 2020–2025 гг., ряд компьютерных систем дозиметрического планирования, учебные пособия и пособия для специалистов. Имеет место несоответствие национальных, ведомственных, международных норм, доз, единиц измерений. Люди некоторых профессий (летчики, космонавты) подвергаются воздействию ИИ, превышающему естественный фон на земле в десятки и сотни раз. В клинических рекомендациях Минздрава России дозы для лучевой терапии разной локализации различаются в десятки раз. Зафиксирован недостаток учебных компьютерных систем по планированию лучевой терапии. Авторами переведены на русский язык для открытого использования три учебных пособия МАГАТЭ, ВОЗ. Признано целесообразным организовать межведомственное взаимодействие при разработке и утверждении новых НРБ с учетом современного российского и международного опыта; верифицировать дозы лучевой терапии в клинических рекомендациях; унифицировать дозы для отдельных профессий и методики оценки профессиональных радиационных рисков; внедрить в образовательный процесс вузов компьютерные программы планирования лучевой терапии, учебные пособия и руководства ВОЗ, МАГАТЭ.

Ключевые слова: ионизирующие излучения, нормы радиационной безопасности, гигиена труда, дозы

Вклад авторов: А. Л. Еремин — дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Н. М. Богатов — редактирование, концепция медицинской физики; Н. Е. Бей — анализ клинических рекомендаций Минздрава России, компьютерных программ; В. А. Баранов — анализ правоприменительной практики контроля НРБ; А. В. Кленевский — анализ НРБ в клинике; Т. С. Дахужев — апробация компьютерных систем дозиметрического планирования; все авторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

✉ **Для корреспонденции:** Алексей Львович Еремин
ул. Ставропольская, д. 149, г. Краснодар, 350040, Россия; aereimin@yandex.ru

Статья получена: 22.07.2026 **Статья принята к печати:** 08.08.2026 **Опубликована онлайн:** 18.09.2026

DOI: 10.24075/rbh.2026.173

Авторские права: © 2026 принадлежат авторам. Лицензиат: РНИМУ им. Н. И. Пирогова. Статья размещена в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE HYGIENIC REGULATION OF IONIZING RADIATION

Eryomin AL¹✉, Bogatov NM¹, Bey NE¹, Baranov VA², Klenevskii AV³, Dahuzhev TS⁴¹ Kuban State University, Krasnodar, Russia² Office of Rosпотребнадзор in the Krasnodar Region, Krasnodar, Russia³ Clinical Oncological Dispensary No. 1, Krasnodar, Russia⁴ Ashkhamaf Adygeya Republican Clinical Oncological Dispensary, Maikop, Russia

Technologies based on ionizing radiation (IR) are used in many areas of human activity, ranging from nuclear energy and national defense to medical diagnosis and therapy. Consequently, the hygienic assessment of the effects of IR is a scientifically and practically important interdisciplinary problem. This study aimed to analyze the challenges encountered and the approaches used to assess the radiation dose–effect relationship, thereby substantiating the need to harmonize radiation safety standards (RSS) at the current stage and highlighting the central role of evidence-based and preventive medicine in this field. We reviewed, researched, and analyzed IAEA's "Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards" and Russian SanPiN (sanitary norms and regulations) documentation, dose-related recommendations issued by the Russian Ministry of Health between 2020 and 2025, radiation therapy software solutions, and training manuals and clinical practice guidelines. The effort revealed a discrepancy between national, departmental, and international standards, dose tiers, and units of measurement. In some professions, such as piloting and spaceflight, occupational exposure to ionizing radiation exceeds the natural terrestrial background level by tens or even hundreds of times. The radiation-therapy doses specified in the Russian Ministry of Health's clinical recommendations differ by as much as tenfold across anatomical sites. There is a shortage of educational software designed to teach radiation therapy treatment planning. The authors translated three textbooks published by the IAEA and WHO into Russian and made these freely available. The following measures were identified as feasible and advisable: organizing interdepartmental cooperation on the development and approval of new RSS, taking into account current Russian and international practices; verifying radiotherapy dose recommendations in clinical guidelines; aligning dose categories for specific professions and harmonizing methods for assessing occupational radiation risks; and supplementing university curricula with radiotherapy-planning software, as well as WHO and IAEA textbooks and guidelines.

Keywords: ionizing radiation, radiation safety standards, occupational health, doses

Author contribution: Eryomin AL — study design, material collection and processing, text authoring; Bogatov NM — text editing, formalization of the concept of medical physics; Bey NE — analysis of clinical recommendations of the Ministry of Health of Russia, review of software solutions; Baranov VA — analysis of the law enforcement practice in the field of RSS control; Klenevskii AV — analysis of RSS in the clinical practice; Dahuzhev TS — testing of radiotherapy planning software; all authors — approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

✉ **Correspondence should be addressed:** Alexey L. Eryomin
Stavropolskaya, 149, Krasnodar, 350040, Russia; aereimin@yandex.ru

Received: 22.07.2026 **Accepted:** 08.08.2026 **Published online:** 18.09.2026

DOI: 10.24075/rbh.2026.173

Copyright: © 2026 by the authors. Licensee: Pirogov University. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

После открытия ионизирующих излучений (ИИ) в XIX–XX вв. их изучение и практическое применение в XX–XXI столетиях развивались стремительными темпами: были разработаны системы измерений в различных средах — от производственных и природных до космических, установлены закономерности дозовых эффектов в рамках доказательной медицины. Технологии на основе ИИ проникли в ключевые сферы человеческой деятельности — от атомной энергетики и оборонных комплексов до медицинской диагностики и терапии, фундаментальных научных исследований и лучевой терапии с использованием циклотронов и синхротронов, что делает проблему гигиенической оценки воздействия ИИ междисциплинарной и сохраняющей высокую научно-практическую значимость. По данным ВОЗ (2023), ежегодно в мире проводят более 4200 млн радиологических обследований в целях диагностики, 40 млн процедур с использованием ядерных материалов и 8,5 млн процедур лучевой терапии. «Эксперт-физик по контролю за источниками ионизирующих и неионизирующих излучений» и «медицинский физик» — должности, утвержденные приказом Минздрава России (2023) [1], со следующими квалификационными требованиями: высшее образование — специалитет, магистратура по специальности (направлению подготовки) «Медицинская физика». Между тем, для контроля необходимы утвержденные унифицированные нормы, предельно допустимые уровни (ПДУ) ИИ, предельно допустимые дозы (ПДД) облучения, а для эффективного и безопасного планирования лучевой терапии — разовые очаговые дозы (РОД), суммарные очаговые дозы (СОД). На международном уровне с целью межведомственной унификации норм стал переход от ряда специализированных организаций системы ООН к обозначению головной, обобщающей и публикующей работы по теме МАГАТЭ [2] во взаимодействии с ВОЗ. В России нормы радиационной безопасности (НРБ) традиционно утверждает Роспотребнадзор.

Целью работы было проанализировать проблемы и подходы к верифицированной оценке влияния «доза–эффект» физического фактора ИИ для обоснования целесообразности унификации на современном этапе норм радиационной безопасности (НРБ) и императива доказательной и профилактической медицины.

Материалы и методы

Проведен сравнительный анализ международной и российской нормативных баз: НРБ МАГАТЭ и СанПиН; практического опыта правоприменительной практики, доз по клиническим рекомендациям Минздрава России 2020–2025 гг., ряда компьютерных систем дозиметрического планирования, учебных пособий и пособий для специалистов.

Эволюция единиц измерений ИИ и современная унификация в системе СИ

В 1928 г. принят «рентген» в качестве первой международной величины для измерения ИИ. В дальнейшем в 1940–1970-х гг. развертка единиц измерений развивалась с определением следующих единиц: кюри, резерфорд, эрг, кулон/кг, Дж/кг, рад, рем (рентгеновский эквивалент), бэр (биологический эквивалент рентгена) и др., в том числе с производными в единицу времени. Многопараметричность совместности с накоплением больших баз данных по «дозам–эффектам»

могла приводить к феномену «запутанного мира радиационной дозиметрии» [3]. В 2018 г. Генеральная конференция по мерам и весам (ГКМВ) одобрила трансформацию Международной системы единиц (СИ-9) [4], в том числе: активность радионуклида — беккерель (Бк), поглощенная доза, керма — грей (Гр), эквивалентная доза — зиверт (Зв). В СИ-9 есть раздел «Единицы величин, описывающие биологические и физиологические явления», где сказано: в медицинской диагностике и терапии для количественной оценки биологической активности также используют единицы, которые пока еще не могут быть выражены в единицах СИ; механизм действия еще недостаточно изучен, чтобы его можно было измерить с точки зрения физико-химических параметров; ввиду их важности для охраны здоровья и безопасности ВОЗ взяла на себя ответственность за определение Международных единиц ВОЗ (WHO IU) биологической активности. В СИ-9 и документах ВОЗ отсутствуют ссылки на «международные единицы» для радиофармпрепаратов (РФП), применяемых как для диагностики, так и для брахитерапии. Это направление может быть важным как при планировании дозо-эффективной брахитерапии, так и в связи с организацией в России к 2026 г. крупнейшего в Европе производства РФП в наукограде Обнинске. Следует отметить и деятельность Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям (МКРЕ) — например, публикацию по лучевой терапии фотонным излучением [5].

Унификация нормирования безопасности на уровне специализированных учреждений ООН

За 120 лет исследований ИИ влияния на здоровье свой вклад в развитие проблематики внесли международные общественные организации: Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) [6], Международная организация по медицинской физике (IOMP), Международное агентство по исследованию рака (МАИР) и др. На межгосударственном уровне произошел переход с фактической передачей в 2012 г. ВОЗ [2] функций головной структуры по нормированию Международному агентству по атомной энергии (МАГАТЭ), которое и опубликовало Международные нормы безопасности и радиационной защиты (НРБ МАГАТЭ) [7] от имени специализированных организаций-спонсоров — ВОЗ, Международной организации труда (МОТ), Панамериканской организации здравоохранения (ПАОЗ), Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Следует отметить вклад Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН), который в 2022 г. в докладе Генеральной Ассамблеи ООН «Источники, воздействие и риски, связанные с ИИ» представил комплексную глобальную оценку частоты и доз медицинского облучения, их распределения и тенденций в медицинских категориях, оценку профессионального воздействия ИИ и др. [8].

Нормы радиационной безопасности (НРБ) в России, целесообразность сравнительного анализа, обновления и межведомственного взаимодействия

Роспотребнадзор как наследник системы государственного санитарного надзора СССР традиционно утверждает НРБ в России. Сложившаяся традиция логична в условиях развитых ранее социальной гигиены и организации

здравоохранения; радиационной гигиены, гигиены труда, гигиены детей и подростков, профилактической медицины, в том числе предупреждения и борьбы с онкозаболеваемостью (второй по значимости причиной смертности населения), определения рисков для здоровья населения и предупреждения отрицательного влияния физического фактора. Учитывая утверждение 15 лет назад норм в Санитарных правилах и нормативах [9, 10] и активное обновление единиц, доз, норм и накоплении больших данных измерений и оценки, целесообразно обновить и российское законодательство. В России производственный контроль, утверждение норм, доз ИИ, федеральный государственный надзор за их соблюдением в настоящее время носят многоведомственный характер и осуществляются в системах Роспотребнадзора, Росздравнадзора и Минздрава, Ростехнадзора, Федерального медико-биологического агентства, РАН, Росатома, Ростеха, Министерства обороны России, Роскосмоса и др. [11–14]. Учитывая международный опыт и российскую специфику, перспективы развития в медицинской физике, атомной, авиакосмической и других отраслях экономики, целесообразно организовать межведомственное взаимодействие при разработке и утверждении новых НРБ. Существует проблема отмены лицензирования: лицензированием обслуживания генерирующих источников ионизирующего излучения, используемых в медицинской деятельности, радиологических медицинских изделий, никто не занимается, или эта функция переходит к Росздравнадзору и пр. Целесообразно проанализировать квалификацию, приборную и кадровую обеспеченность для специализированного федерального надзора и производственного контроля.

Некоторые аспекты для углубленного сравнительного анализа и перспективного учета при обновлении НРБ

Введенные в действие в 2025 г. новые СанПиН 2.6.4115-25 [15] ссылками подтверждают актуальность и действие базовых СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) [9] и СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) [10]. Следует отметить, что в СанПиН 2.6.4115-25 для обозначения больших активностей содержатся ссылки на единицу измерения «кюри», которая хотя и была допущена к применению в России (2009) [16], но по данным ряда источников считается устаревшей, в связи с чем в системе СИ заменена на «беккерель». Национальный институт стандартов и технологий (NIST) настоятельно не рекомендует продолжать использовать кюри (так же как и рентген, рад и бэр) [17]. Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ) в своих рекомендациях относит кюри (наряду с радом и рентгеном) к таким единицам измерения, «которые могут временно применяться до даты, установленной национальными предписаниями, но которые не должны вводиться, если они не используются» [18], что целесообразно учесть в будущем при пересмотре российского законодательства. Опубликованные в СанПиН НРБ-99/2009 «годовые пределы дозы и соответствующий фатальный риск» соответствуют МКРЗ-2007 и НРБ МАГАТЭ, за исключением непрерывной функции взвешивающего коэффициента излучения для нейтронов. Между тем, «весовые тканевые коэффициенты и соответствующие им коэффициенты риска» обозначены и соответствуют Публикации МКРЗ 60 (1991), но отсутствуют данные и ссылки на более позднюю Публикацию МКРЗ 103 (2007) [6].

Контроль и нормы при рентген-радиологических исследованиях и техническом обслуживании источников ионизирующего излучения в России

Актуальность дозиметрического сопровождения при рентген-радиологических исследованиях (РРИ) в России показана гигиенистами [19, 20]. В Постановлении Правительства РФ [21] и приказе Минздрава России [1] при лицензировании правоприменительная практика касается «немедицинского использования ИИ». Опубликован современный анализ радиационных аварий в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии со сравнением российских и международных подходов к терминологии и классификации [22].

Перспективы развития лучевой терапии в России и актуальность унификации в медико-техническом обеспечении

В соответствии с аналитическими обзорами уровень оснащённости России высокими технологиями для лучевой терапии соответствовал стандартам развивающихся стран [23]. В 2020 г. Правительство РФ приняло постановление о развитии синхротронной и нейтронной инфраструктуры [24], в том числе о ликвидации отставания в развитии в России протонной лучевой терапии к 2027 г., определении головной научной организации по выполнению программы НИЦ «Курчатовский институт» [25]. Между тем, при организации здравоохранения следует отметить растущую необходимость учета и преодоления сложившегося неравномерного распределения высокотехнологичной медпомощи в России. Проблему пока сложно преодолеть — с «медицинским туризмом» на тысячи километров, наличием и перспективным развитием только в отдельных регионах протонной, нейтронной, нейтрон-захватной терапии, установок «гамма-нож»; карботерапии (углеродной, ионами углерода) и др. Исследования нейтрон-захватной терапии ведут в г. Новосибирске в ИЯФ имени Г. И. Будкера [26], а также в НИЯУ МИФИ, совместно с Российским онкологическим научным центром имени Н. Н. Блохина и ФМБЦ имени А. И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства (ФМБА) России. Наблюдается неравномерность внедрения современных методов лучевой терапии по регионам России. Например, в Южном федеральном округе (ЮФО) и Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО) с общим населением 27 млн человек отсутствуют протонная, нейтронная терапия и ряд других высокотехнологичных методов и установок для радиотерапии. Следует отметить целесообразность анализа на федеральном уровне и принятия мер по обеспечению как высокотехнологичным оборудованием, так и кадрами — инженерами медтехники (направление подготовки «Биотехнические системы и технологии» и др.), организаторами здравоохранения и другими, с сопоставлением с международным опытом (МАГАТЭ) планирования служб лучевой терапии [27]. Для совершенствования и унификации подходов для инженеров медтехники, технических служб по обслуживанию радиотерапевтической техники в клиниках авторы совместно с коллегами перевели на русский язык международные технические спецификации радиотерапевтического оборудования для лечения онкологии, разработанные ВОЗ-МАГАТЭ, и разместили их в открытом доступе [28].

Таблица 1. Результаты анализа количества, диапазона, нижнего и верхнего пределов доз облучения (Гр) при лучевой терапии различных видов новообразований по 90 утвержденным Минздравом России клиническим рекомендациям (2020–2025 гг.)

Протокол лечения	Число фракций	Разовая очаговая доза, Гр	Суммарная очаговая доза, Гр
Протоколы Минздрава России 2020–2025 гг.	1,0–50,0	0,5–40,0	2,0–180,0

Дозы облучения в лучевой терапии: от эволюции ориентировочных принципов к доказательной медицине и унификации доз в России

Что касается лучевой терапии в действующих Санитарных правилах и нормах (СанПиН) фактически используется принцип ALARA (англ. As Low As Reasonably Achievable — «как можно ниже, насколько это возможно»), сформулированный еще в 1954 г. МКРЗ. То есть прямо не устанавливая пределы доз для пациентов, расширяют границы дозволенного облучения — до масштабов, которые медицинский персонал сочтет необходимыми. В российских СанПиН принцип оптимизации (ALARA) не подкреплен точными количественными ориентирами и ссылками на современные дозовые ограничения (как для пораженных тканей и органов-мишеней, так и для органов риска), что создает правовую неопределенность. Так, в СанПиН 2.6.1.2523-09 (НРБ-99/2009) согласно п. 5.4.1 «...не устанавливаются пределы доз для пациентов, но применяются принципы обоснования назначения медицинских процедур и оптимизации защиты пациентов». В соответствии с п. 4.4. Санитарных правил СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) «проведение терапевтических рентгенорадиологических процедур должно быть обосновано с учетом требований: риск отказа от лучевой терапии заведомо превышает риск от облучения при ее проведении»; отсутствуют ссылки на специфические общепринятые расчеты «рисков». Согласно п. 4.7. СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010), «оптимизация радиационной защиты пациентов должна предусматривать достижение полезного медицинского эффекта рентгенорадиологических процедур, или лечебного результата, при наименьших возможных уровнях облучения». Следует отметить международную инициативу «Количественный анализ воздействия на нормальные ткани в клинике» (QUANTEC) с накоплением баз данных дозо-эффектных зависимостей для различных органов и тканей, основанных на данных многолетних наблюдений [29, 30]. Ситуация изменилась благодаря накоплению опытных результатов в науке и определению доз в клинических рекомендациях Минздрава России (КР МЗ РФ), утверждаемых на основании постановления Правительства РФ [31]. Намечился переход к профилактической медицине с императивом «не навреди» и к доказательной медицине по эффективности лечения. Это важный фактор современности, так как планирование медицинскими физиками лучевой терапии начинается именно с содержащихся в КР МЗ РФ величин разовой и суммарной очаговой дозы. Нами проведен анализ количества, диапазона, лимитов доз (Гр) фотонной терапии при различных новообразованиях по всем

90 утвержденным (2020–2025 гг.) КР МЗ РФ, в которых лучевая терапия указана как метод возможного лечения, размещенным в специальном разделе «клинических рекомендаций» (clin-rec) на официальном сайте Минздрава России (табл. 1).

В ходе анализа установлено, что дозы облучения в 90 КР МЗ РФ варьируют и различаются в десятки раз: для разовой очаговой дозы (РОД) — от 0,5 до 40,0 Гр, для суммарной очаговой дозы (СОД) — от 7,0 до 180,0 Гр. Следует отметить, что в разработке каждой КР МЗ РФ участвовало большое количество авторитетных специалистов, а дозы в КР МЗ РФ в основном сопровождаются ссылками на публикации в зарубежных источниках.

Разброс количественных значений РОД и СОД между разными нозологиями, с одной стороны, может быть интерпретирован как ожидаемый и оправданный биофизически (твердые/мягкие ткани) и радиобиологически (радиочувствительность). С другой стороны, вопрос касается вариативности доз для одной и той же нозологической стадии развития заболевания, используемых видов излучения и оборудования для лучевой терапии, что требует дальнейших исследований, верификации, расчетов и объяснений.

В ходе исследования разработана табличная матрица по клиническим рекомендациям Минздрава России, где и аккумулировали данные для первичного анализа доз облучения. Для понимания масштаба проблемы и демонстрации широкого диапазона доз облучения примеры из конкретных протоколов приведены в табл. 2.

Разницу доз облучения для различных онкопораженных органов-мишеней (в КР МЗ РФ — в десятки раз) можно сравнить с разницей «взвешивающих коэффициентов для различных тканей и органов при калькуляции эффективной дозы» (СП 2.6.1.2612-10; Публикация МКРЗ 60, 1991), которые различаются в 20 раз — от 0,01 для клеток костных поверхностей до 0,20 для гонад; взвешивающих коэффициентов тканей, различающихся в 12 раз — от 0,01 до 0,12 (по Публикации МКРЗ 103, 2007). Это может также свидетельствовать о необходимости дальнейших научных исследований в области доказательной медицины, расчетов и обоснованных объяснений.

Нормативы и руководства для специалистов, аспекты гиперинформационной многоведомственности, целесообразности унификации, сравнения с международным опытом

При исторически развитых ядерных технологиях, атомной промышленности, экономических отраслях, где применяют ИИ в России, руководств и рекомендаций по общим вопросам радиационной безопасности множество.

Таблица 2. Табличная матрица доз облучения по протоколам клинических рекомендаций (образец с двумя примерами)

Нозологическая единица	РОД, Гр	СОД, Гр
Рак предстательной железы*	1,8–19,0	8,0–160,0
Фолликулярная лимфома**	1,8–2,0	4,0–30,0

Примечание: * — Рак предстательной железы. МКБ-10: С61. Клинические рекомендации. М.: МЗ РФ, 2021; ** — Фолликулярная лимфома. МКБ-10: С82, С85.9. Клинические рекомендации. М.: МЗ РФ, 2024.

Таблица 3. Предельные значения радиационного воздействия для специалистов агентств-партнеров МКС и нормы профессионального облучения в СанПиН НРБ-99/2009 и НРБ МАГАТЭ

Космические агентства, Роспотребнадзор, МАГАТЭ — субъекты нормирования	Лимит карьеры/ профессиональные нормы	Зависимость от пола/возраста
Роскосмос * Канадское космическое агентство * Европейское космическое агентство *	1000 мЗв	Отсутствует
Японское агентство аэрокосмических исследований *	3% REID в среднем	Нижний предел: 500 мЗв для женщин в возрасте от 27 до 30 лет. Верхний предел: 1000 мЗв для мужчин старше 46 лет
НАСА США (текущее) *	3% REID при уровне достоверности 95%	Нижний предел: ~180 мЗв для женщин 30 лет. Верхний предел: ~700 мЗв для мужчин 60 лет
НАСА (предлагаемое обновление) *	600 мЗв	Отсутствует
Роспотребнадзор, нормы профессионального облучения, СанПиН НРБ-99/2009	Годовые пределы доз 100 мЗв за 5 лет, но не более 50 мЗв за год	Отсутствует
МАГАТЭ, нормы профессионального облучения, НРБ МАГАТЭ-2015	Годовые пределы доз 100 мЗв за 5 лет, но не более 50 мЗв за год	Отсутствует

Примечание: * — данные [47].

По ссылкам на официальные нормативные библиотеки и коды — действующие СанПиН на официальном сайте Роспотребнадзора «Перечень нормативных правовых актов, содержащих обязательные требования в области использования источников ионизирующего излучения»; утвержденные Роспотребнадзором методические указания (МУ) и рекомендации (МР), касающиеся радионуклидной диагностики с радиофармпрепаратами (МУ 2.6.1.1892-04), лучевой терапии (МУ 2.6.1.2135-06), брахитерапии (МУ 2.6.1.2712-10), ликвидации последствий радиационной аварии (МР 2.6.1.0360-24) и др.; утвержденные Росстандартом государственные стандарты (ГОСТ), касающиеся средств индивидуальной защиты персонала медучреждений от воздействия ИИ (ГОСТ Р 58168—2018), методов контроля при лучевой терапии (ГОСТ Р 57517—2017), радиометрических приборов (ГОСТ Р 57518—2017), радиометрического контроля (ГОСТ Р 72075—2025) и др.; 103 действующих нормативных правовых акта (НП) федеральных норм и правил в области использования атомной энергии на официальном сайте Ростехнадзора. Система законодательства, утверждаемая и контролируемая Ростехнадзором, касается радиационной безопасности и разрабатывается в соответствии со статьей 6 Федерального закона № 170-ФЗ [32]. В правоприменительной практике это имеет значение для здоровья населения. В частности, развернута дискуссия по утверждению нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух и установлению границ санитарно-защитной зоны (СЗЗ) по границе площадки АЭС [33]. А это важно для экспертиз организации новых АЭС, в том числе при строительстве «Южной АЭС» и других в соответствии с утвержденной Правительством РФ схемой размещения до 2042 г. объектов электроэнергетики [34]. В МАГАТЭ для специалистов разработано множество справочников, касающихся в том числе руководств по реагированию медицинских физиков на радиологическую аварию [35], радиационной защиты при медицинском использовании ИИ (совместно с ВОЗ и МОТ) [36], выбора технологий для лучевой терапии с учетом радиационной безопасности [37], глоссариев по ядерной безопасности и физической защите [38], определения поглощенной дозы при лучевой терапии, международных рекомендаций по дозиметрии [39], требований к точности и факторов

неопределенности в лучевой терапии [40] и др. Появились перечни литературы на русском языке для медицинских физиков, работающих в области лучевой терапии новообразований [41].

К нормированию радиационной безопасности в авиакосмической медицине

В ряде исследований значимости ИИ для здоровья летчиков показано, что на высотах от 9000 до 12000 м ИИ могут превышать естественный радиационный фон в 31–41 раз [42]. Рассмотрен риск влияния ИИ на здоровье летчиков [43]. Проведено сравнение величин ИИ (космическая радиация), получаемых членами экипажей воздушных судов эффективные дозы, с показателями, рекомендованными международными организациями [44]. Между тем, отсутствуют утвержденные нормы радиационной безопасности ИИ в авиационной медицине. Опыт по радиационной безопасности, накопленный в России за шестидесятилетие пилотируемых полетов в космос, сопоставлен с российским законодательством и международными рекомендациями [45]. Проанализированы ретроспектива нормирования, оценки суммарного радиационного риска и возможного сокращения продолжительности жизни космонавтов при длительных орбитальных и межпланетных полетах [46]. На современном этапе развития, связанном с функционированием на околоземной орбите Международной космической станции (МКС), следует отметить различные подходы национальных космических агентств к предельным дозам — как с зависимостью от пола/возраста, так и по лимитам в мЗв или риску радиационно-индуцированной смерти (REID) [47]. Проведен сравнительный анализ норм доз (табл. 3).

Актуальность стратегий национальных космических агентств, их совместных проектов в области пилотируемых полетов и исследований неуклонно возрастает. Федеральным законом [48] утверждено сотрудничество РФ и КНР в области создания Международной научной лунной станции. В документе НАСА «Цели миссии «Луна-Марс» изложен подход к реализации программы агентства по исследованию дальнего космоса с участием человека [49], в том числе программа «Артемиды» с созданием базы на Луне для обеспечения пилотируемых полетов

на Марс. Риск, связанный с освоением космоса, ложится на плечи небольшой группы людей (космонавтов, астронавтов, тайконавтов, вьоманавтов), но выгоду от них получает все общество. Такой дисбаланс возлагает на космические агентства ответственность за обеспечение максимальной защиты специалистов (корпус корабля и станций, скафандры, время воздействия), призванной свести к минимуму сбои в работе во время полета, на протяжении всей их карьеры и после ухода из агентств. Предпринимаются попытки прогнозирования рисков лунных и марсианских миссий с учетом их продолжительности (дни), поглощенных доз (Гр), эффективных доз (мЗв), смертельного риска (%) [47]. Следует отметить и аспекты радиационной безопасности, развиваемые в России в связи с перспективой создания космических аппаратов с ядерными реакторами [50].

Высшее образование и учебники для вузов по медицинской физике, радиационной гигиене и дозиметрии

Кадровая потребность в медицинских физиках при радионуклидной терапии и диагностической визуализации обозначена МАГАТЭ [51]. Следует отметить оценочный анализ: почему медицинская дозиметрия является профессией только в США и что это значит для медицинских физиков во всем мире [52]. Подтверждена актуальность обеспечения в России дозиметрического сопровождения планирования и оценки эффективности лечения как фундаментальной методологической основы современной радионуклидной терапии [53]. В образовании и популяризации системы знаний целесообразно утвердить рациональный подход с позиций доказательной медицины и информационной гигиены с целью профилактики радиофобий, предоставления в сжатом виде верифицированной информации в «поиске знаний» в гиперинформационном обществе [54]. В России учебные пособия по радиационной гигиене, дозиметрии, радиационной медицинской физике для вузов разработаны специалистами ряда вузов и НИИ [55–61]. В связи с их разнообразием и количеством важной является унификация с учетом международного опыта. Разработаны учебники международного уровня (МАГАТЭ). Их преимуществом является то, что они подготовлены лучшими специалистами из десятков стран, охватывают широкий круг вопросов, включая радиационную физику, дозиметрию и приборы, качество изображения и его восприятие, способы визуализации, специфические темы, достижения в области цифровых технологий, а также радиационную биологию, защиту, нормы безопасности, одобрены несколькими международными профессиональными организациями, могут быть полезны для тех, кто готовится к сертификации как медицинский физик, радиолог или рентгенолог. Между тем, несмотря на то что Россия является членом МАГАТЭ, ряд объемных учебников не переведен на русский язык. Авторы совместно с коллегами перевели на русский язык обширные (общий объем 1494 с.) учебные пособия по физике ядерной медицины и диагностической радиологии для преподавателей и студентов (МАГАТЭ) и разместили их в открытом доступе [62, 63].

Учебные клинические компьютерные системы дозиметрического планирования

В соответствии с распоряжениями Правительства РФ, касающимися цифровой трансформации в области высшего образования [64] и здравоохранения [65], особое значение имеет анализ наличия, разработки, обучения в вузах и внедрения компьютерных систем дозиметрического планирования облучения при лучевой терапии, проверки-верификации эффективности и безопасности планирования, калькуляции доз и т. д. с учетом отечественных КР МЗ РФ, зарубежного опыта и медицинско-технического обеспечения, международных практических рекомендаций [39, 40]. В ходе нашей работы установлено, что к 2026 г. в РФ появились 12 клинических платформ дозиметрического планирования и ни одной учебной, при этом за рубежом их 33, а образовательных пять. Клинические отечественные системы — это «АМФОР», «Гаммаплан РТ», «СканПлан», «Plan B», «Plan N», «Plan D», «Rplan», Plan X ДЛТ, Plan P, Plan NE, Plan I, «MMS». Клинические зарубежные компьютерные системы планирования — это «3DVH», «Accuray», «Contour+», «Corvus», «Delta4DVH Anatomy», «Eclipse», «ERGO++», «FULLACCESS», «GPT-RadPlan», «HDR+», «MultiPlug», «iPlan RT», «MIM Symphony», «MONACO», «Multiplan», «MIM Maestro», «Panther TPS», «Plan W», «BrainlabElements», «PlanIQ», «Prism», «RapidPlan», «SagiPlan», «Spot», «SunSCAN 3D», «Theraplan Plus», «TOPAS», «Tracer», «VariSeed», «Vitesse», «XiO-CE 3D», «Pinnacle», «Focal». Учебные зарубежные компьютерные комплексы — это «FoCa», «MuriPlan», «OpenTPS», «PortPy», «Vert». При этом для планирования телетерапии и брахитерапии определены 14 комплексов дозиметрического планирования, отдельно для телетерапии — 29, для брахитерапии — 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распространение ионизирующих излучений (ИИ) при развитии современных технологий, освоении сфер деятельности человека, применении в медицине требует особого внимания к проблемам влияния ИИ на здоровье населения, организации здравоохранения, нормирования, высшего образования квалифицированных специалистов. Актуальна организация межведомственного взаимодействия при разработке и утверждении новых норм радиационной безопасности (НРБ) с учетом исторически сложившейся российской специфики и современного международного опыта.

В прикладных, узкоспециализированных аспектах целесообразными являются:

- анализ на местах квалификации специалистов, кадровой обеспеченности медицинскими физиками, экспертами по измерениям физических факторов для специализированного федерального надзора и производственного контроля, обеспеченности измерительными приборами;
- унификация оценки профессиональных радиационных рисков, нормативов доз для отдельных профессий;
- внедрение в образовательный процесс вузов международных учебных пособий ВОЗ, МАГАТЭ и разработка учебных компьютерных систем дозиметрического планирования лучевой терапии.

Литература

1. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 2.05.2023 № 206н «Об утверждении Квалификационных требований к медицинским и фармацевтическим работникам с высшим образованием».
2. ВОЗ. Исполнительный комитет. Сто тридцать первая сессия. EB131/11. 22 мая 2012 г. Доклад секретариата. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности.
3. Boyd MA. The confusing world of radiation dosimetry — 9444. WM2009 Conference Waste Management for the Nuclear Renaissance. USA, Phoenix, 2009; 1–5.
4. Международная система единиц (SI). Издание 9-е. М.: Росстандарт, 2019.
5. Назначение, протоколирование и отчетность в лучевой терапии фотонным излучением с модуляцией интенсивности. Доклад МКРЕ № 83. Издание Международной комиссии по радиационным единицам и измерениям. М.: МИФИ, 2020.
6. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). М.: Алана, 2009.
7. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Вена: МАГАТЭ, 2015.
8. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. NY.: UN, 2022.
9. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)».
10. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)».
11. Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения».
12. Федеральный закон от 31.07.2020 № 248-ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации».
13. Санитарные правила СП 1.1.1058-01 «Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».
14. Приказ Министерства здравоохранения РФ от 18.10.2023 № 556н «Об утверждении перечня индикаторов риска нарушения обязательных требований при осуществлении федерального государственного лицензионного контроля (надзора) за деятельностью в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующих) (за исключением случая, если эти источники используются в медицинской деятельности)».
15. СанПиН 2.6.4.115-25 «Санитарно-эпидемиологические требования в области радиационной безопасности населения при обращении источников ионизирующего излучения».
16. Постановление Правительства РФ от 31.10.2009 № 879 «Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации».
17. Thompson A, Taylor BN. Use of the international system of units (SI). NIST Special Publication, Gaithersburg, 2008. DOI: 10.6028/nist.sp.811e2008.
18. Legal units of measurement OIML D 2 Consolidated Edition 2007 (E). International Organization of Legal Metrology. International Document. Paris: OIML, 2007.
19. Онищенко Г. Г., Попова А. Ю., Романович И. К., Водоватов А. В., Башкетова Н. С., Историк О. А. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения. Радиационная гигиена. 2019; 12 (1): 6–24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
20. Онищенко Г. Г., Попова А. Ю., Романович И. К., Водоватов А. В., Башкетова Н. С., Историк О. А. и др. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 2. Радиационные риски и совершенствование системы радиационной защиты. Радиационная гигиена. 2019; 12 (2): 6–24. DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
21. Постановление Правительства РФ от 25.01.2022 № 45 «О лицензировании деятельности в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующих) (за исключением случая, если эти источники используются в медицинской деятельности)».
22. Водоватов А. В., Чипига Л. А., Рыжов С. А., Петрякова А. В., Библин А. М., Горский Г. А. Радиационные аварии в лучевой и радионуклидной диагностике и терапии: сравнение российских и международных подходов к терминологии и классификации. Радиационная гигиена. 2024; 17 (1): 97–110. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.
23. Хмелевский Е. В., Каприн А. Д. Состояние радиотерапевтической службы России: сравнительный анализ и перспективы развития. Онкология. Журнал им. П. А. Герцена. 2017; 6 (4): 38–41. DOI: 10.17116/onkolog20176438-41.
24. Постановление Правительства РФ от 16.03.2020 № 287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу».
25. Иванов Е. М., Кленов Г. И., Максимов В. И., Хорошков В. С., Черных А. Н. Перспективы развития протонной терапии в России. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022; 67 (3): 41–6. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-3-41-46.
26. Бичурина М. И., Касатов Д. А., Колесников Я. А., Соколова Е. О., Таскаева Ю. С., Таскаев С. Ю. Бор-нейтронозахватная терапия: физические аспекты. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2024; 7 (4): 19–27. DOI: 10.37174/2587-7593-2024-7-4-19-27.
27. Планирование национальных служб лучевой терапии: практическое пособие. Вена: МАГАТЭ, 2015.
28. Технические спецификации радиотерапевтического оборудования для лечения онкологии. ВОЗ-МАГАТЭ. Краснодар: КубГУ, 2025.
29. Количественный анализ повреждений здоровых органов и тканей при проведении лучевой терапии злокачественных новообразований. М.: АМФР, 2015.
30. Лебедева Ж. С. Обзорные статьи по материалам QUANTEC. Медицинская физика. 2018; (4): 80–7.
31. Постановление Правительства РФ от 17.11.2021 № 1968 «Об утверждении Правил поэтапного перехода медицинских организаций к оказанию медицинской помощи на основе клинических рекомендаций, разработанных и утвержденных в соответствии с частями 3, 4, 6–9 и 11 статьи 37 Федерального закона «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации».
32. Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
33. Курындин А. В., Шаповалов А. С., Орлов М. Ю., Иванов Е. А., Строганов А. А., Тимофеев Н. Б. Соответствие между размерами санитарно-защитной зоны и предельно допустимыми выбросами радиоактивных веществ атомных станций в атмосферу. Ядерная и радиационная безопасность. 2024; 2 (112): 5–17. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.001.
34. Распоряжение Правительства РФ от 30.12.2024 № 4153-р «О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года».
35. Pocket guide for medical physicists supporting response to a nuclear or radiological emergency. Vienna: IAEA, 2020.
36. Радиационная защита и безопасность при медицинском использовании ионизирующего излучения. Вена: МАГАТЭ, 2023.
37. Selecting megavoltage treatment technologies in external beam radiotherapy. Vienna: IAEA, 2022.
38. IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Vienna: IAEA, 2022.
39. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: международные практические рекомендации по дозиметрии. Вена: МАГАТЭ, 2025.
40. Требования к точности и факторы неопределенности в лучевой терапии. Вена: МАГАТЭ, 2022.

41. Ратнер Т. Г. Литература на русском языке для медицинских физиков, работающих в области лучевой терапии злокачественных новообразований. Медицинская физика. 2021; (2): 92–6.
42. Бухтияров И. В., Зибарев Е. В., Бетц К. В. Эпидемиологическое исследование по анализу смертности пилотов воздушных судов гражданской авиации в Российской Федерации. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2022; 56 (4): 83–8. DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-4-83-88.
43. Scheibler C, Toprani SM, Mordukhovich I, Schaefer M, Staffa S, Nagel ZD, et al. Cancer risks from cosmic radiation exposure in flight: a review. Front Public Health. 2022; 10: 947068. DOI: 10.3389/fpubh.2022.947068.
44. Okedeyi SA, Kayode YO, Joshua A, Atilade AO, Ikuemonisan FE, Ajose AS, et al. Assessing annual exposures dose and other radiological parameters from cosmic radiation among flight crews in Nigeria local airline. FJS. 2024; 8 (1): 183–9. DOI: 10.33003/fjs-2024-0801-2203.
45. Сакович В. А. Шестидесятилетие пилотируемых космических полетов в свете основных принципов обеспечения радиационной безопасности. Основные принципы в рекомендациях МКРЗ и в российском законодательстве. Радиация и риск. 2022; 31 (1): 64–73. DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-1-64-73.
46. Шафиркин А. В., Бенгин В. В., Шуршаков В. А. Локальные тканевые дозы при полете вне магнитосферы земли за различной защитой космического корабля с учетом снижения эффективности действия протонов и ионов гелия. Авиакосмическая и экологическая медицина. 2025; 59 (1): 44–54. DOI: 10.21687/0233-528X-2025-59-1-44-54.
47. Space Radiation and Astronaut Health: Managing and Communicating Cancer Risks. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2021. DOI: 10.17226/26155.
48. Федеральный закон от 12.06.2024 № 128-ФЗ «О ратификации Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Китайской Народной Республики о сотрудничестве в области создания Международной научной лунной станции».
49. Moon To Mars Objectives. Washington: NASA, 2022.
50. Общие положения обеспечения безопасности космических аппаратов с ядерными реакторами НР-101-17. Утверждены приказом Ростехнадзора от 23.10.2017 № 442.
51. Medical physics staffing needs in diagnostic imaging and radionuclide therapy: an activity based approach. Vienna: IAEA, 2018.
52. Graham S, Mills M. Why is Medical Dosimetry a profession only in the United States and what does this mean for Medical Physicists worldwide? J Appl Clin Med Phys. 2021; 22 (8): 4–5. DOI: 10.1002/acm2.13362.
53. Наркевич Б. Я., Крылов А. С., Рыжков А. Д., Гелашвили Т. М. Дозиметрическое сопровождение радионуклидной терапии. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2023; 6 (2): 66–84. DOI: 10.37174/2587-7593-2023-6-2-66-84.
54. Еремин А. Л. Информационная гигиена: современные подходы к гигиенической оценке контента и физических сигналов носителей информации. Гигиена и санитария. 2020; 99 (4): 351–5. DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-4-351-355.
55. Гребеньков С. В., Жолус Б. И., Довгуша В. В. и др. Военно-морская и радиационная гигиена. Учебно-методическое руководство. В 2-х томах. СПб.: ЛИО Редактор, 1998.
56. Климанов В. А., Крамер-Агеев Е. А., Смирнов В. В. Радиационная дозиметрия. М.: НИЯУ МИФИ, 2014; 648 с.
57. Ильин Л. А., Коренков И. П., Наркевич Б. Я. Радиационная гигиена. Учебник. М.: Геотар-Медиа, 2021; 440 с.
58. Зорина И. Г., Соколов В. Д. Основы радиационной гигиены. Учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2023; 224 с.
59. Черняев А. П., Лыкова Е. Н., Борщеговская П. Ю. Радиационная медицинская физика: учебник. М.: МГУ, 2023; 559 с.
60. Романович И. К., Иванов Д. О., редакторы. Оценка радиационного риска по данным радиационно-гигиенической паспортизации территорий: учебное пособие. СПб.: СПбГПМУ, 2023; 92 с.
61. Бекман И. Н. Ядерная медицина: физические и химические основы: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2024; 400 с.
62. Физика ядерной медицины: пособие для преподавателей и студентов. МАГАТЭ. Препринт. Краснодар: КубГУ, 2024; 724 с.
63. Физика диагностической радиологии: пособие для преподавателей и студентов. МАГАТЭ. Препринт. Краснодар: КубГУ, 2025; 770 с.
64. Распоряжение Правительства РФ от 21.12.2021 № 3759-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации науки и высшего образования».
65. Распоряжение Правительства РФ от 17.04.2024 № 959-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации здравоохранения».

References

1. Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya RF ot 2.05.2023 № 206n "Ob utverzhdenii Kvalifikatsionnykh trebovaniy k meditsinskim i farmatsevticheskim rabotnikam s vysshim obrazovaniem" (in Rus.).
2. VOZ. Ispolnitel'nyy komitet. Sto tridtsat' pervayasessiya. EB131/11. 22 maya 2012 g. Doklad sekretariata. Radiatsionnaya zashchita i bezopasnost' istochnikov izlucheniya: Mezhdunarodnye osnovnye normy bezopasnosti (in Rus.).
3. Boyd MA. The confusing world of radiation dosimetry — 9444. WM2009 Conference Waste Management for the Nuclear Renaissance. USA, Phoenix, 2009; 1–5.
4. Mezhdunarodnaya sistema edinits (SI). Izdanie 9-e. M.: Rosstandart, 2019 (in Rus.).
5. Naznachenie, protokolirovaniye i otchetnost' v luchevoj terapii fotonnym izlucheniem s modulyatsiej intensivnosti. Doklad MKRE № 83. Izdanie Mezhdunarodnoj komissii po radiatsionnym edinitsam i izmereniyam. M.: MIFI, 2020 (in Rus.).
6. Publikatsiya 103 Mezhdunarodnoj Komissii po radiatsionnoj zashchite (MKRZ). M.: Alana, 2009 (in Rus.).
7. Radiatsionnaya zashchita i bezopasnost' istochnikov izlucheniya: Mezhdunarodnye osnovnye normy bezopasnosti. Vena: MAGATE, 2015 (in Rus.).
8. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation. NY.: UN, 2022.
9. SanPiN 2.6.1.2523-09 "Normy radiatsionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009)" (in Rus.).
10. Sanitarnye pravila i normativy SP 2.6.1.2612-10 "Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoj bezopasnosti (OSPORB-99/2010)" (in Rus.).
11. Federal'nyy zakon ot 09.01.1996 № 3-FZ "O radiatsionnoj bezopasnosti naseleniya" (in Rus.).
12. Federal'nyy zakon ot 31.07.2020 № 248-FZ "O gosudarstvennom kontrole (nadzore) i munitsipal'nom kontrole v Rossijskoj Federatsii" (in Rus.).
13. Sanitarnye pravila SP 1.1.1058-01 "Organizatsiya i provedenie proizvodstvennogo kontrolya za soblyudeniem sanitarnykh pravil i vypolnieniem sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatij" (in Rus.).
14. Prikaz Ministerstva zdravookhraneniya RF ot 18.10.2023 № 556n "Ob utverzhdenii perechnya indikatorov riska narusheniya obyazatel'nykh trebovaniy pri osushchestvlenii federal'nogo gosudarstvennogo litsenziionnogo kontrolya (nadzora) za deyatel'nost'yu v oblasti ispol'zovaniya istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya (generiruyushchikh) (za isklucheniem sluchaya, esli eti istochniki ispol'zuyutsya v meditsinskoj deyatel'nosti)" (in Rus.).
15. SanPiN 2.6.4115-25 "Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya v oblasti radiatsionnoj bezopasnosti naseleniya pri obrashchenii istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya" (in Rus.).
16. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 31.10.2009 № 879 "Ob utverzhdenii Polozheniya o edinitsakh velichin, dopuskaemykh k primeniyu v Rossijskoj Federatsii" (in Rus.).

17. Thompson A, Taylor BN. Use of the international system of units (SI). NIST Special Publication, Gaithersburg, 2008. DOI: 10.6028/nist.sp.811e2008.
18. Legal units of measurement OIML D 2 Consolidated Edition 2007 (E). International Organization of Legal Metrology. International Document. Paris: OIML, 2007.
19. Onishchenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Sovremennye printsipy obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti pri ispol'zovanii istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya v meditsine. Chast' 1. Tendentsii razvitiya, struktura luchevoj diagnostiki i dozy meditsinskogo oblucheniya. Radiatsionnaya gigiena. 2019; 12 (1): 6–24 (in Rus.). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-1-6-24.
20. Onishchenko GG, Popova AYU, Romanovich IK, Vodovатов AV, Bashketova NS, Istorik OA, et al. Sovremennye printsipy obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti pri ispol'zovanii istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya v meditsine. Chast' 2. Radiatsionnye riski i sovershenstvovanie sistemy radiatsionnoy zashchity. Radiatsionnaya gigiena. 2019; 12 (2): 6–24 (in Rus.). DOI: 10.21514/1998-426X-2019-12-2-6-24.
21. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 25.01.2022 № 45 "O litsenzirovanii deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya istochnikov ioniziruyushchego izlucheniya (generiruyushchikh) (za isklyucheniem sluchaya, esli eti istochniki ispol'zuyutsya v meditsinskoj deyatel'nosti)" (in Rus.).
22. Vodovатов AV, Chipiga LA, Ryzhov SA, Petryakova AV, Biblin AM, Gorskiy GA. Radiatsionnye avarii v luchevoj i radionuklidnoj diagnostike i terapii: sravnenie rossijskikh i mezhdunarodnykh podkhodov k terminologii i klassifikatsii. Radiatsionnaya gigiena. 2024; 17 (1): 97–110 (in Rus.). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-1-97-110.
23. Khmelevskiy EV, Kaprin AD. Sostoyanie radioterapevticheskoy sluzhby Rossii: sravnitel'nyy analiz i perspektivy razvitiya. Onkologiya. Zhurnal im. P. A. Gertsena. 2017; 6 (4): 38–41 (in Rus.). DOI: 10.17116/onkolog20176438-41.
24. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 16.03.2020 № 287 "Ob utverzhdenii Federal'noy nauchno-tekhnicheskoy programmy razvitiya sinkhrotronnykh i nejtronnykh issledovaniy i issledovatel'skoj infrastruktury na period do 2030 goda i dal'nejshuyu perspektivu" (in Rus.).
25. Ivanov EM, Klenov GI, Maksimov VI, Khoroshkov VS, Chernykh AN. Perspektivy razvitiya protonnoj terapii v Rossii. Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'. 2022; 67 (3): 41–6 (in Rus.). DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-3-41-46.
26. Bikchurina MI, Kasatov DA, Kolesnikov YaA, Sokolova EO, Taskaeva YuS, Taskaev SYu. Bor-nejtrono-zakhvatnaya terapiya: fizicheskie aspekty. Onkologicheskij zhurnal: lucheovaya diagnostika, lucheovaya terapiya. 2024; 7 (4): 19–27 (in Rus.). DOI: 10.37174/2587-7593-2024-7-4-19-27.
27. Planirovanie natsional'nykh sluzhb luchevoj terapii: prakticheskoe posobie. Vena: MAGATE, 2015 (in Rus.).
28. Tekhnicheskie spetsifikatsii radioterapevticheskogo oborudovaniya dlya lecheniya onkologii. VOZ-MAGATE. Krasnodar: KubGU, 2025 (in Rus.).
29. Kolichestvennyy analiz povrezhdenij zdorovykh organov i tkanej pri provedenii luchevoj terapii zlokachestvennykh novoobrazovaniy. M.: AMFR, 2015 (in Rus.).
30. Lebedeva ZhS. Obzornye stat'i po materialam QUANTEC. Meditsinskaya fizika. 2018; (4): 80–7 (in Rus.).
31. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 17.11.2021 № 1968 "Ob utverzhdenii Pravil poetapnogo perekhoda meditsinskikh organizatsij k okazaniyu meditsinskoj pomoshchi na osnove klinicheskikh rekomendatsij, razrabotannykh i utverzhennykh v sootvetstvii s chastyami 3, 4, 6–9 i 11 stat'i 37 Federal'nogo zakona «Ob osnovakh okhrany zdorov'ya grazhdan v Rossijskoj Federatsii" (in Rus.).
32. Federal'nyy zakon ot 21.11.1995 № 170-FZ "Ob ispol'zovanii atomnoj energii" (in Rus.).
33. Kuryndin AV, Shapovalov AS, Orlov MYu, Ivanov EA, Stroganov AA, Timofeev NB. Sootvetstvie mezhdru razmerami sanitarno-zashchitnoj zony i predel'no dopustimymi vybrosami radioaktivnykh veshchestv atomnykh stantsij v atmosferu. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'. 2024; 2 (112): 5–17 (in Rus.). DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.001.
34. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 30.12.2024 № 4153-r "O General'noj skheme razmeshcheniya ob'ektov elektroenergetiki do 2042 goda" (in Rus.).
35. Pocket guide for medical physicists supporting response to a nuclear or radiological emergency. Vienna: IAEA, 2020.
36. Radiatsionnaya zashchita i bezopasnost' pri meditsinskom ispol'zovanii ioniziruyushchego izlucheniya. Vena: MAGATE, 2023 (in Rus.).
37. Selecting megavoltage treatment technologies in external beam radiotherapy. Vienna: IAEA, 2022.
38. IAEA Nuclear Safety and Security Glossary. Vienna: IAEA, 2022.
39. Opredelenie pogloshchennoj dozy pri distantsionnoj luchevoj terapii: mezhdunarodnye prakticheskie rekomendatsii po dozimetrii. Vena: MAGATE, 2025 (in Rus.).
40. Trebovaniya k tochnosti i faktory neopredelennosti v luchevoj terapii. Vena: MAGATE, 2022 (in Rus.).
41. Ratner TG. Literatura na russkom yazyke dlya meditsinskikh fizikov, rabotayushchikh v oblasti luchevoj terapii zlokachestvennykh novoobrazovaniy. Meditsinskaya fizika. 2021; (2): 92–6 (in Rus.).
42. Bukhtiyarov IV, Zibarev EV, Betts KV. Epidemiologicheskoe issledovanie po analizu smernosti pilotov vozdukhnykh sudov grazhdanskoj aviatsii v Rossijskoj Federatsii. Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2022; 56 (4): 83–8 (in Rus.). DOI: 10.21687/0233-528X-2022-56-4-83-88.
43. Scheibler C, Toprani SM, Mordukhovich I, Schaefer M, Staffa S, Nagel ZD, et al. Cancer risks from cosmic radiation exposure in flight: a review. Front Public Health. 2022; 10: 947068. DOI: 10.3389/fpubh.2022.947068.
44. Okedeyi SA, Kayode YO, Joshua A, Atilade AO, Ikuemonisan FE, Ajose AS, et al. Assessing annual exposures dose and other radiological parameters from cosmic radiation among flight crews in Nigeria local airline. FJS. 2024; 8 (1): 183–9. DOI: 10.33003/fjs-2024-0801-2203.
45. Sakovich VA. Shestidesyatiletie pilotiruemykh kosmicheskikh poletov v svete osnovnykh printsipov obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti. Osnovnye printsipy v rekomendatsiyakh MKRZ i v rossijskom zakonodatel'stve. Radiatsiya i risk. 2022; 31 (1): 64–73 (in Rus.). DOI: 10.21870/0131-3878-2022-31-1-64-73.
46. Shafirkin AV, Bengin VV, Shurshakov VA. Lokal'nye tkanevye dozy pri polete vne magnitosfery zemli za razlichnoj zashchitoj kosmicheskogo korablya s uchetoм snizheniya effektivnosti dejstviya protonov i ionov geliya. Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2025; 59 (1): 44–54 (in Rus.). DOI: 10.21687/0233-528X-2025-59-1-44-54.
47. Space Radiation and Astronaut Health: Managing and Communicating Cancer Risks. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2021. DOI: 10.17226/26155.
48. Federal'nyy zakon ot 12.06.2024 № 128-FZ "O ratifikatsii Soglasheniya mezhdru Pravitel'stvom Rossijskoj Federatsii i Pravitel'stvom Kitajskoj Narodnoj Respubliki o sotrudnichestve v oblasti sozdaniya Mezhdunarodnoj nauchnoj lunnnoy stantsii" (in Rus.).
49. Moon To Mars Objectives. Washington: NASA, 2022.
50. Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti kosmicheskikh apparatov s yadernymi reaktorami NP-101-17. Utverzhdeny prikazom Rostekhnadzora ot 23.10.2017 № 442 (in Rus.).
51. Medical physics staffing needs in diagnostic imaging and radionuclide therapy: an activity based approach. Vienna: IAEA, 2018.
52. Graham S, Mills M. Why is Medical Dosimetry a profession only in the United States and what does this mean for Medical Physicists worldwide? J Appl Clin Med Phys. 2021; 22 (8): 4–5. DOI: 10.1002/acm2.13362.
53. Narkevich BYa, Krylov AS, Ryzhkov AD, Gelashvili TM. Dozimetriceskoe soprovozhdenie radionuklidnoj terapii. Onkologicheskij zhurnal: lucheovaya diagnostika, lucheovaya terapiya. 2023; 6 (2): 66–84 (in Rus.). DOI: 10.37174/2587-7593-2023-6-2-66-84.
54. Eremin AL. Informatsionnaya gigiena: sovremennye podkhody k igienicheskoy otsenke kontenta i fizicheskikh signalov nositelej informatsii. Gigiena i sanitariya. 2020; 99 (4): 351–5 (in Rus.). DOI: 10.47470/0016-9900-2020-99-4-351-355.
55. Grebenkov SV, Zhulus BI, Dovgusha VV, et al. Voenno-morskaya i radiatsionnaya gigiena. Uchebno-metodicheskoe rukovodstvo. V 2-kh tomakh. SPb.: LIO Redaktor, 1998 (in Rus.).

56. Klimanov VA, Kramer-Ageev EA, Smirnov VV. Radiatsionnaya dozimetriya. M.: NIYaU MIFI, 2014; 648 p. (in Rus.).
57. Ilin LA, Korenkov IP, Narkevich BYa. Radiatsionnaya gigiena. Uchebnik. M.: Geotar-Media, 2021; 440 p. (in Rus.).
58. Zorina IG, Sokolov VD. Osnovy radiatsionnoj gigieny. Uchebnoe posobie dlya vuzov. SPb.: Lan', 2023; 224 p. (in Rus.).
59. Chernyaev AP, Lykova EN, Borshchegovskaya PYu. Radiatsionnaya meditsinskaya fizika: uchebnik. M.: MGU, 2023; 559 p. (in Rus.).
60. Romanovich IK, Ivanov DO, redaktory. Otsenka radiatsionnogo riska po dannym radiatsionno-gigienicheskoy pasportizatsii territorij: uchebnoe posobie. SPb.: SPbGPMU, 2023; 92 p. (in Rus.).
61. Bekman IN. Yadernaya meditsina: fizicheskie i khimicheskie osnovy: uchebnik dlya vuzov. M.: Yurajt, 2024; 400 p. (in Rus.).
62. Fizika yadernoj meditsiny: posobie dlya prepodavatelej i studentov. MAGATE. Preprint. Krasnodar: KubGU, 2024; 724 p. (in Rus.).
63. Fizika diagnosticheskoy radiologii: posobie dlya prepodavatelej i studentov. MAGATE. Preprint. Krasnodar: KubGU, 2025; 770 p. (in Rus.).
64. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 21.12.2021 № 3759-r "Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoj transformatsii nauki i vysshego obrazovaniya" (in Rus.).
65. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.04.2024 № 959-r "Ob utverzhdenii strategicheskogo napravleniya v oblasti tsifrovoj transformatsii zdravookhraneniya" (in Rus.).