

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Б.Я. Наркевич

Ассоциация медицинских физиков России, Москва
Национальный медицинский исследовательский центр онкологии
им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ, Москва

Проанализировано современное состояние и перспективы обеспечения радиационной безопасности в подразделениях ядерной медицины России. Приведены литературные данные и основные результаты собственных исследований в течение последних 15 лет по обеспечению радиационной безопасности пациентов, персонала, отдельных лиц из населения и окружающей среды в подразделениях радионуклидной диагностики и радионуклидной терапии. Рассмотрены наиболее важные и требующие своего решения проблемы по обеспечению радиационной безопасности в ядерной медицине. Проведен анализ действующей в России нормативной документации в указанной области и представлены предложения по ее совершенствованию.

Ключевые слова: *ядерная медицина, радиационная безопасность, пациенты, персонал, население, окружающая среда, нормативная документация*

Введение

Обеспечение радиационной безопасности (РБ) пациентов, персонала, населения и окружающей среды является обязательным условием развития и клинического использования средств и методов ядерной медицины.

Современный и адекватный уровень этого обеспечения требует выполнения целого ряда общих и специфических требований к технологиям радионуклидной диагностики (РНД) и радионуклидной терапии (РНТ), к средствам радиационных измерений, радиозащитному оборудованию, к квалификации персонала в области РБ, а также к разработке соответствующей нормативно-методической документации.

Кроме того, необходимость решения данных проблем обусловлена постоянным уве-

личением количества новых центров ядерной медицины у нас в стране, в которых профессиональная квалификация кадров в области РБ все еще остается недостаточной. При этом в действующих центрах ядерной медицины радиационно-гигиеническая грамотность подавляющего большинства врачей-радиологов, среднего медперсонала и даже руководителей подразделений ядерной медицины и администрации клиник заслуживает неудовлетворительной оценки. Другими факторами важности проблемы являются возросшие требования контролирующих организаций (Роспотребнадзора, Ростехнадзора, Минприроды и др.) к выполнению требований действующих нормативных документов в области РБ, а также сохраняющийся в настоящее время устойчивый уровень радиофобии пациентов после аварий на АЭС в Чернобыле и Фукусиме.

Профильные международные организации, прежде всего МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН уделяют большое внимание проблемам обеспечения РБ в ядерной медицине. В частности, за последние годы по разным аспектам обеспечения РБ как в РНД, так и в РНТ были напечатаны 11 Публикаций МКРЗ, а также более 40 рекомендаций и докладов МАГАТЭ.

Цель данной работы – рассмотрение современного состояния и перспектив развития средств и технологий обеспечения РБ в ядерной медицине по наиболее важным литературным данным и по результатам собственных 15-летних исследований в этой области, а также анализ действующей в России нормативной документации с выработкой предложений по ее совершенствованию.

Обеспечение радиационной безопасности пациентов

В основе всех аспектов проблемы обеспечения РБ пациентов при проведении радионуклидных диагностических и терапевтических процедур лежит требование правильного определения величины активности радиофармпрепарата, вводимого в организм пациента. В настоящее время разработана и широко используется система расчетного определения лучевых нагрузок на пациентов, основанная на математическом аппарате так называемого MIRD-формализма. Она основана на вычислении органных и очаговых доз в виде произведения двух сомножителей, один из которых учитывает геометрию облучения органа-мишени от органов-источников и радиационно-физические характеристики испускаемых излучений, а второй характеризует физиологическую составляющую процесса внутреннего облучения в виде так называемой функций удержания радиофармпрепарата в органах-источниках. Далее по значениям доз облучения всех органов-мишеней рассчитывается удельная эффективная доза на 1 МБк введенной активности РФП. Ее значения для 169 различных радиофармпрепаратов были табулированы в Публикациях 53, 80, 106 и 128 МКРЗ [1–4].

Основным достоинством такого подхода является удобство его практического применения, поскольку лучевая нагрузка на пациента вычисляется простым перемножением значений активности введенной порции радиофармпрепарата и табулированной удельной эффек-

тивной дозы. К другому достоинству следует отнести высокую точность определения значений радиационно-физического сомножителя в основной формуле MIRD-формализма. Этого удалось достигнуть за счет эффективного использования метода Монте-Карло-моделирования процессов эмиссии, переноса и поглощения бета- и гамма-излучения в геометрических и антропоморфных фантомах взрослых людей и детей различного возраста и пола, в том числе в воксельных фантомах условного человека [5]. Такой подход позволил также объективизировать выбор активности вводимых радиофармпрепаратов для детей в зависимости от массы тела, но не от возраста [6].

С целью уточнения данных МКРЗ по дозам облучения пациентов при РНД нами были проведены расчетные исследования вклада от низкоэнергетических электронов Оже, электронов внутренней конверсии и характеристического излучения, испускаемых при радиоактивном распаде 7 “чистых” гамма-излучающих радионуклидов ^{67}Ga , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{111}In , $^{113\text{m}}\text{In}$, ^{123}I , ^{125}I , ^{201}Tl , используемых в качестве метки для 22 различных диагностических радиофармпрепаратов. Расчеты выполнены по упрощенной линейной модели точечного мононаправленного источника и в рамках сферической модели облучения на основе литературных данных по Монте-Карло-моделированию переноса короткопробежного излучения. Результаты вычислений сравнены с данными Публикации 53 МКРЗ [1]. Показано, что вклад от низкоэнергетического излучения составляет в среднем не более нескольких процентов. Был сделан вывод, что такой вклад обуславливает нецелесообразность введения соответствующих поправок в нормативные документы по дозовым оценкам внутреннего облучения от радиофармпрепаратов [7].

Представляет определенный интерес установление статистической связи между значениями вводимых активностей различных диагностических радиофармпрепаратов и вероятностью возникновения у пациентов принципиально возможных, хотя и крайне маловероятных, радиационно-индуцированных поражений. К настоящему времени уже предложена стандартизованная методика расчета подобных радиационных рисков в зависимости от типа радиологической процедуры и возраста пациента [8].

Переходя к нерешенным проблемам обеспечения РБ пациентов в ядерной медицине,

следует отметить, что наиболее актуальной является и будет долгое время оставаться таковой проблема разработки диагностических и терапевтических радиофармпрепаратов с высокой тропностью к тканям различных патологических очагов, в том числе и разработки радиофармпрепаратов адресной доставки. За последнее время в этом направлении было сделано достаточно много, особенно в плане синтеза и клинического внедрения принципиально новых терапевтических радиофармпрепаратов, в том числе и с применением альфа-излучающих радионуклидов, и формирования так называемых тераностических пар радиофармпрепаратов, но указанные разработки по-прежнему нуждаются в дальнейшем развитии.

Вторая по важности проблема – индивидуализация значений вводимых пациентам активностей различных радиофармпрепаратов как часть более глобальной проблемы разработки средств и технологий персонализированной медицины. На основе такой индивидуализации будет решена еще одна актуальная задача – получение достоверной диагностической информации при РНД или клинически выраженного терапевтического эффекта при РНТ при минимизации лучевой нагрузки на пациента в соответствии с основной концепцией планирования медицинского облучения [9].

Оптимизировать величину активности вводимого каждому пациенту радиофармпрепарата в строгом смысле этого понятия не удастся вследствие принципиальной невозможности точного определения индивидуальной функции удержания диагностических радиофармпрепаратов для конкретных пациентов при РНД. Пока для решения этой сложной проблемы предложена концепция так называемых референсных диагностических уровней, выражаемых в терминах вводимой активности [10]. Указанные уровни определяются как 75-процентили статистического распределения вводимых активностей для одного и того же РНД-исследования, выполняемого по одному и тому же протоколу с одним и тем же радиофармпрепаратом на одной и той же гамма-камере для разных пациентов. Ясно, что конкретные значения таких уровней сильно зависят от конкретных условий, аппаратуры и режимов проводимых исследований, и поэтому могут носить только рекомендательный характер. В рекомендациях МАГАТЭ [11] табулированы референсные диагностические уровни для наиболее

часто используемых РНД-исследований по типовым протоколам.

Если рассматривать только РНД, то среди пока еще нерешенных остается проблема необходимости повсеместного снижения популяционных доз облучения пациентов. Такое снижение должно проводиться за счет не только разработки новых радиофармпрепаратов с повышенной тропностью к патологическим очагам, но и минимизации или, в идеале, даже полного исключения клинически не обоснованных назначений на проведение РНД-исследований. Не секрет, что практически во всех подразделениях РНД России основной поток пациентов направляется на сцинтиграфию костей скелета. У 70–80 % таких пациентов результат отрицательный, что обуславливает не только неэффективное расходование дорогостоящего радиофармпрепарата и эксплуатационных ресурсов гамма-камер, но и неоправданное увеличение популяционных доз медицинского облучения населения.

По сравнению с РНД проблема обеспечения РБ больных при РНТ остается еще более актуальной, несмотря на определенные достижения в этой области. Это, прежде всего, разработка простых и, самое главное, более точных технологий дозиметрического планирования РНТ. Если при планировании внешнего дистанционного облучения онкологических больных уже минимизирована общая неопределенность планирования и доставки дозы облучения к опухолевому очагу до значений не более 3–5 %, то в настоящее время аналогичная неопределенность для РНТ обычно составляет несколько десятков процентов. Это обусловлено не только чисто технологическими трудностями проведения серии измерений накопленной в патологическом очаге активности терапевтического радиофармпрепарата, особенно “чистых” бета-излучающих радионуклидов типа ^{89}Sr , но и обнаруженного в многочисленных работах эффекта расхождения функций удержания при введении больному последовательно диагностической и терапевтической активности одного и того же терапевтического радиофармпрепарата. Хотя при использовании тераностических пар радиофармпрепаратов, то есть двух радиофармпрепаратов на основе одного и того же фармацевтического соединения, но меченных диагностическим и терапевтическим радионуклидами соответственно, технология планирования несколько облегча-

ется, но его точность по-прежнему остается недостаточной.

Как известно, наибольшее количество процедур РНТ в России и за рубежом выполняется с ^{131}I -йодидом натрия. Нами был проведен сравнительный анализ разных методик дозиметрического планирования РНТ с ^{131}I больных диффузным токсическим зобом и дифференцированным раком щитовидной железы [12]. В развитие этих исследований была разработана новая дозиметрическая модель транспорта ^{131}I в организме с учетом радиационного повреждения клеток щитовидной железы, основанная на математическом аппарате нелинейных дифференциальных уравнений. Разработан алгоритм и программа идентификации параметров предложенной математической модели. Разработанный подход был использован также для анализа различия кривых удержания при введении диагностической и терапевтической активности ^{131}I (так называемого *stunning*-эффекта) у больных раком щитовидной железы. Было показано, что указанное различие обусловлено снижением количества функционирующих нормальных и опухолевых клеток тиреоидных тканей в процессе накопления поглощенной дозы внутреннего облучения [13].

Для тераностической пары радионуклидов $^{123}\text{I}/^{131}\text{I}$ была предложена методика дозиметрического планирования РНТ, основанная на определении в абсолютных единицах активности диагностического радиофармпрепарата с ^{123}I , накопленного в опухолевом очаге. Методика основана на сцинтиграфии шприца с содержащейся в нем диагностической активностью радиофармпрепарата, двухпроекционной сцинтиграфии пациента после инъекции этого радиофармпрепарата и определении накопления РФП при введении рассчитанной методом Монте-Карло поправки на поглощение и рассеяние гамма-излучения ^{123}I в теле пациента и в коллиматоре гамма-камеры. Была использована программа MCNP Монте-Карло-моделирования [14]. Методика была успешно апробирована при сцинтиграфическом исследовании с инъекцией 30 МБк ^{123}I -MIBG ребенку с нейробластомой [15].

Наконец, практически отсутствуют работы по дозиметрическому планированию РНТ с учетом ограничений на толерантные дозы облучения нормальных органов и тканей, особенно критических органов и тканей с высокой

вероятностью возникновения лучевых осложнений вследствие системного воздействия введенных терапевтических радиофармпрепаратов высокой активности.

Также требует дальнейших исследований достоверность появившихся в некоторых работах утверждений о слабой коррелированности и даже об отсутствии взаимосвязи между терапевтическим эффектом РНТ и запланированной дозой внутреннего облучения от введенной активности терапевтического радиофармпрепарата. Нужно идентифицировать причины подобных расхождений, среди которых наиболее вероятными представляются неоднозначность и качественный, а не количественный, характер клинических критериев оценки терапевтического эффекта, отсутствие информации об индивидуальной чувствительности больного к радиационному воздействию введенного радиофармпрепарата на патологический процесс, а также чрезмерно высокая общая неопределенность конечного результата дозиметрического планирования, т.е. оценки очаговой дозы внутреннего облучения.

Отдельной задачей является математическое моделирование радиационных аварий, связанных с экстравазальным введением (вместо запланированного внутривенного введения) терапевтических радиофармпрепаратов. При этом требуется на основе результатов расчета характеристик дозового поля в месте инъекции оценить вероятность возникновения тех или иных радиационно-индуцированных поражений органов и тканей с выработкой практических рекомендаций по минимизации негативных последствий подобных радиационных аварий для здоровья пациентов.

Обеспечение радиационной безопасности персонала

Многолетняя клиническая практика использования средств и технологий ядерной медицины позволила разработать эффективную систему мер по обеспечению РБ персонала подразделений РНД и РНТ. Это, прежде всего, разработка и широкое клиническое внедрение защитного оборудования и инструментария, разработка и унификация протоколов типовых РНД-исследований и процедур РНТ, оптимизация технологий работ с закрытыми и открытыми радионуклидными и генерирующими источниками ионизирующих излучений, в том

числе и работ с очень высокой активностью, организация и выполнение общих и специфических требований к средствам и технологиям проведения РНД и РНТ. Эти и другие аспекты обеспечения РБ персонала нашли свое отражение в ряде международных рекомендаций [11, 16–20] и в отечественных нормативных документах [21–24].

Благодаря этому, в обеспечении РБ персонала уже нет проблем такой высокой степени актуальности, как в обеспечении РБ пациентов. Тем не менее, некоторые важные вопросы в этой области также требуют своего решения.

К ним относится, прежде всего, отсутствие в НРБ-99/2009 норматива по допустимому уровню загрязнения кожных покровов персонала и рабочих поверхностей помещений и оборудования “чистыми” гамма-излучающими радионуклидами, которые используются в качестве радиоактивной метки для подавляющего большинства РФП, используемых для РНД-исследований *in vivo*, и для соединений с ^{125}I , используемых для РНД *in vitro*. Приведенные в НРБ-99/2009 нормативы для регламентации загрязнений альфа- и бета-излучающими радионуклидами не пригодны для оценки загрязнений “чистыми” гамма-излучающими радионуклидами, поскольку эти нормативы выражены в единицах частицы/см²·мин. С целью решения этого вопроса нами было проведено математическое моделирование геометрии и условий измерения типовых загрязнений 7 “чистыми” гамма-эмиттерами и 68 “смешанными” бета-гамма-излучающими радионуклидами. Было показано, что оценка уровней загрязнения гамма-излучателями должна проводиться по уровню мощности амбиентной эквивалентной дозы, а рассчитанные на ее основе нормативы соответствуют по своему радиационному воздействию нормативам для “чистых” бета-излучателей из НРБ-99/2009 [25].

Другой важной нерешенной проблемой является разработка научного обоснования оптимальных технологий профилактики и устранения последствий радиационных аварий в подразделениях ядерной медицины. Основой такой разработки должно быть математическое моделирование различных аварийных ситуаций, особенно в подразделениях РНТ, где последствия таких аварий всегда тяжелее, чем в подразделениях РНД, вследствие проведения работ с открытыми источниками ионизирующих излучений существенно более высокой активности. К ним относятся, прежде всего, раз-

личного рода неисправности и сбой работы системы очистки жидких радиоактивных отходов, когда требуется прогнозировать ожидаемый уровень аварийного облучения персонала, занятого устранением последствий подобных радиационных аварий, с выработкой соответствующих рекомендаций по их ликвидации.

Наконец, всегда остается “вечная” проблема кадрового обеспечения отечественной ядерной медицины. Причем здесь речь идет не столько об адекватной численности персонала в соответствующих подразделениях, сколько об уровне квалификации врачебного и среднего медицинского персонала в области обеспечения как собственной РБ, так и РБ пациентов. Многолетний опыт работы автора в отечественной ядерной медицине показывает, что радиационно-гигиенические знания врачей-радиологов и, в особенности, медицинских сестер не соответствуют тем требованиям, которые предъявляют современные технологии РНД и РНТ. Зачастую врачи-радиологи не понимают даже сути основных радиобиологических и дозиметрических понятий, а средний медперсонал работает под влиянием внушенной себе радиофобии. Требуемая нормативными документами переподготовка по РБ либо вообще не проводится вследствие отсутствия квалифицированных преподавателей из лицензированных организаций, либо проводится формально, без серьезной проверки уровня полученных знаний по РБ., в том числе и практических навыков по ликвидации последствий радиационных аварий.

Обеспечение радиационной безопасности отдельных лиц из населения и окружающей среды

Данному направлению профильные международные организации уделяют все более возрастающее внимание. Если в основополагающей Публикации 60 от 1990 г. [26] МКРЗ декларировала в качестве основных принципов использования источников ионизирующих излучений обоснованность, оптимизацию и нормирование, то в такой же Публикации 103 от 2007 г. [27] к ним еще добавился принцип охраны окружающей среды. Различные аспекты радиационной защиты отдельных лиц из населения и охраны окружающей среды при проведении ядерно-медицинских процедур с соответствующими практиче-

скими рекомендациями представлены в публикациях МАГАТЭ [10, 11, 28–32].

В соответствии с международными рекомендациями и с отечественным нормативным документом МУ 2.6.1.1892–04 [21] любой пациент после проведения РНД-исследований считается радиационно-безопасным для всех окружающих лиц, в том числе и для своих родственников и ухаживающих за ними лиц, в связи с чем не выдвигаются жесткие требования по ограничению контактов между ними и этим пациентом. Как следствие такого отсутствия, в документ [21] был включен пункт об исключении сбора и выдержки на распад жидких радиоактивных отходов в подразделениях РНД, поскольку при их непосредственном сбросе в хозяйственно-бытовую канализацию обеспечивается выполнение всех соответствующих нормативов по охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений.

Однако при выписке пациентов из подразделений РНТ необходимо обеспечивать РБ отдельных лиц из населения, контактирующих с такими пациентами. Соответствующие международные рекомендации содержатся в Публикации 1417 МАГАТЭ [32] и Публикации 94 МКРЗ [33], а отечественные требования – в НРБ-99/2009 [9] и СанПиН 2.6.1.2135–06 [22]. В нормативном документе [9] приведены ограничения по мощности дозы гамма-излучения от тела пациента после курсов РНТ с радиофармпрепаратами, мечеными только радионуклидами ^{131}I , ^{153}Sm и ^{188}Re . В связи с этим нами были проведены расчетные исследования, в которых была определена возможность использования в амбулаторном режиме РНТ различных терапевтических радиофармпрепаратов, меченных одним из 19 бета-гамма-излучающих радионуклидов или из 6 альфа-бета-гамма-излучающих радионуклидов. Критерием допустимости амбулаторного режима была эффективная доза облучения отдельных лиц из населения, которые эпизодически или постоянно контактируют с больным после введения ему радиофармпрепарата. На основе пределов доз, установленных в НРБ-99/2009, были вычислены максимально допустимые активности указанных радионуклидов для различных геометрий и сценариев облучения. Показано, что даже для наиболее консервативных условий облучения госпитализации подлежат больные, проходящие курсы радионуклидной терапии только с радионуклидами ^{111}In и ^{131}I .

Как известно, в 2013 г. была официально принята и утверждена новая версия главного нормативного документа в области радиационной безопасности в целом и окружающей среды в частности – ОСПОРБ-99/2010 [35]. В ней были существенно ужесточены нормативы по сбросу жидких радиоактивных отходов в окружающую среду. Для основного радионуклида ^{131}I , используемого в РНТ, такое ужесточение составило 162 раза, что было подвергнуто вполне обоснованной критике [36]. Тем не менее, данный норматив вступил в силу, из-за чего при проектировании станций спецочистки для подразделений РНТ отечественных радиологических клиник возникли определенные трудности. С целью облегчения такого проектирования были предложены три различных подхода к расчету мощности станции очистки. Показано, что наиболее эффективный вариант проекта может быть определен в рамках подхода, основанного на математическом моделировании процессов выведения радиофармпрепарата из организма больного, а также накопления и выдержки на распад ЖРО в баках-накопителях станции с учетом потока госпитализируемых больных [37].

Нормативная документация

В настоящее время отечественная ядерная медицина функционирует в соответствии с основными нормативными документами Роспотребнадзора по обеспечению РБ [9, 35], а также с разработанными при нашем непосредственном участии профильными регламентирующими документами по радионуклидной диагностике *in vivo* [21], радионуклидной терапии [22], позитронной эмиссионной томографии [23] и по организации надзора и радиационного контроля в подразделениях РНД [38]. Кроме того, действуют нормативные документы по определению лучевой нагрузки на пациентов при радиодиагностических исследованиях *in vivo* [6] и по обеспечению РБ при радионуклидной диагностике *in vitro* [24], а также ряд соответствующих документов Ростехнадзора и Минприроды РФ. Таким образом, нормативное обеспечение подразделений ядерной медицины на сегодняшний день следует считать удовлетворительным.

Однако это не означает, что нормативная документация по обеспечению РБ в ядерной медицине не нуждается в совершенствовании.

Прежде всего, это относится к необходимости устранения целого ряда противоречий не только между новой версией ОСПОРБ-99/2010 в редакции 2013 г. [35] и принятыми раньше регламентирующими документами [21, 22, 24], но и противоречий даже между основополагающими документами по РБ [35] и НРБ-99/2009 [9]. В связи с этим остается актуальной проблема выработки научно обоснованных рекомендаций по устранению этих противоречий и перевод этих рекомендаций в статус регламентирующих требований и нормативов.

Особенно это касается целесообразности обязательного строительства станций специализированной очистки жидких радиоактивных отходов в подразделениях РНТ. Дело в том, что в международных рекомендациях МКРЗ [33] допускается прямой сброс жидких радиоактивных отходов из подразделений РНТ непосредственно в хозяйственно-бытовую канализацию без какой-либо предварительной очистки и (или) выдержки на распад. В рекомендациях подчеркивается, что благодаря сильнейшему разбавлению сбрасываемых отходов в коммуникациях и коллекторах канализации крупных городов концентрация радиоактивности, поступающей на городские станции аэрации, вполне соответствует принятым ограничениям МКРЗ. В этих рекомендациях МКРЗ отказ от систем очистки медицинских жидких радиоактивных отходов жестко не навязывается. Там указывается, что данный вопрос должен решаться в соответствии с национальным законодательством каждой страны. Но при этом указывается, что строительство и эксплуатация станций очистки в медицинских учреждениях экономически очень невыгодны, а реального выигрыша в обеспечении РБ населения и окружающей среды они практически ничего не дают, приводя, кроме того, к неоправданному повышению уровня профессионального облучения персонала при его работе на подобных станциях.

Наконец, необходимо устранить неясности и разночтения в нормативной документации по оценке вредных условий труда в подразделениях ядерной медицины. После принятия федерального закона № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» от 28 декабря 2013 г. [39] и соответствующих подзаконных актов возникла неопределенность относительно применимости принятой в них методики оценки условий труда для персонала подразделений РНД и РНТ. С целью устранения данного затруднения был разработан ряд конкретных

предложений по совершенствованию указанных подзаконных актов [40].

Заключение

Анализ современного состояния проблемы обеспечения радиационной безопасности в отечественной ядерной медицине показывает, что в целом уже разработанные ранее технологии, средства, организационные мероприятия и нормативные документы позволяют гарантировать высокий уровень радиационной защиты пациентов, персонала, населения и окружающей среды при проведении любых диагностических и терапевтических процедур со всеми известными радиофармпрепаратами. Тем не менее, в этой области еще остается целый ряд вопросов, требующих своего решения на основе дальнейшего развития средств и методов радиационной гигиены для ядерной медицины.

Список литературы

1. ICRP, 1988. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. ICRP Publication 53 // Ann. ICRP. Vol. 18. № 1–4.
2. ICRP, 1998. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. Addendum to ICRP Publication 53. ICRP Publication 80 // Ann. ICRP. Vol. 28. № 3.
3. ICRP, 2008. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. Addendum 3 to ICRP Publication 53. ICRP Publication 106 // Ann. ICRP. Vol. 38. № 1–2.
4. ICRP, 2015. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128 // Ann. ICRP. Vol. 44. № 2S.
5. ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110 // Ann. ICRP. Vol. 39. № 2.
6. Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований: Методические указания. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2014. 36 с.
7. Наркевич Б.Я., Дергачева Б.А. Дозы внутреннего облучения от низкоэнергетических электронов и фотонов от инкорпорирован-

- ных диагностических радиофармпрепаратов // Мед. физика. 2011. № 4(52). С. 77–86.
8. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. 2015. 34 с.
 9. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523–09.
 10. Applying of Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine. Safety Reports Series No. 40. IAEA. Vienna. 2005.
 11. Радиологическая защита при медицинском облучении ионизирующим излучением. Серия норм безопасности, № RS-G-1.5. МАГАТЭ. Вена. 2004.
 12. Липанова Н.Н., Клепов А.Н., Наркевич Б.Я. Проблемы дозиметрического сопровождения и математического моделирования радиойодотерапии щитовидной железы // Мед. физика. 2010. № 3(47). С. 43–45.
 13. Липанова Н.Н., Клепов А.Н., Наркевич Б.Я. Дозиметрическое планирование и дозовый контроль в радиойодотерапии рака щитовидной железы // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2012. Т. 57. № 3. С. 53–65.
 14. Лысак Ю.В., Климанов В.А., Наркевич Б.Я. Количественная сцинтиграфия для контроля доз внутреннего облучения патологических очагов при радионуклидной терапии // Мед. физика. 2016. № 4(72). С. 63–71.
 15. Лысак Ю.В., Гончаров М.О., Наркевич Б.Я., Ширяев С.В. Применение метода Монте-Карло для повышения точности дозиметрического планирования радионуклидной терапии // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2017. Т. 62. № 1. С. 49–55.
 16. Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: PET/CT. Safety Reports Series No. 58. IAEA. Vienna. 2008.
 17. Оценка профессионального облучения вследствие поступления радионуклидов. Серия норм безопасности, № RS-G-1.2. МАГАТЭ. Вена. 1999.
 18. Радиационная защита при профессиональном облучении. Серия норм безопасности, № RS-G-1.1. МАГАТЭ. Вена. 1999.
 19. Оценка профессионального облучения от внешних источников ионизирующего излучения. Серия норм безопасности, № RS-G-1.3. МАГАТЭ. Вена. 1999.
 20. Methods for Assessing Occupational Radiation Doses due to Intakes of Radionuclides. Safety Reports Series No. 37. IAEA. Vienna. 2004.
 21. МУ 2.6.1.1892–04. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов.
 22. СанПиН 2.6.1.2368–08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников.
 23. СанПиН 2.6.1.3288–15. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии.
 24. МУ 2.6.1.2808–10. Обеспечение радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики методами радиоиммунного анализа *in vitro*.
 25. Наркевич Б.Я., Малаева Н.С., Зиновьева Н.П. Радиоактивная загрязненность рабочих поверхностей “чистыми” гамма-излучателями: Концепция и технология нормирования // Мед. физика, 2000. № 8. С. 40–47.
 26. ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Ann. ICRP. Vol. 21. № 1–3.
 27. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Пер. с англ. – М.: Изд. ООО ПКФ “Алана”. 2009. 344 с.
 28. Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance: Safety Guide. Safety Standards Series No. RS-G-1.7. IAEA. Vienna. 2004.
 29. основополагающие принципы безопасности. Серия норм безопасности, № SF-1. МАГАТЭ. Вена.
 30. Classification of Radioactive Waste: Safety Guide. Safety Standards Series No. GSG-1. IAEA. Vienna. 2009.
 31. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR Part 3. МАГАТЭ. Вена. 2015.
 32. Release of Patients after Radionuclide Therapy. Safety Reports Series No. 63. IAEA. Vienna. 2009.

33. ICRP, 2004. Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides. ICRP Publication 94 // Ann. ICRP. Vol. 34. № 2.
34. Наркевич Б.Я., Ширяев С.В., Лысак Ю.В. и соавт. Радиационно-гигиеническое обоснование радионуклидной терапии в амбулаторном режиме. // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7. № 2. С. 47–58.
35. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010. СП 2.6.1.2612–10. (В ред. изменений № 1, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43).
36. Наркевич Б.Я., Ширяев С.В., Крылов В.В. и соавт. Повышает ли новая версия ОСПОРБ-99/2010 уровень радиационной безопасности в ядерной медицине? // Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2015. Т. 60. № 6. С. 5–9.
37. Наркевич Б.Я., Лысак Ю.В., Коновалов И.С. и соавт. Расчетные исследования проектной мощности станции очистки жидких радиоактивных отходов в подразделениях радионуклидной терапии // Мед. физика. 2015. № 4(68). С. 60–68.
38. МУ 2.6.1.2500–09. Организация надзора за обеспечением радиационной безопасности и проведение радиационного контроля в подразделении радионуклидной диагностики.
39. Федеральный закон РФ от 28 декабря 2013 г. № 426-ФЗ “О специальной оценке условий труда”.
40. Наркевич Б.Я., Костылев В.А., Бушманов А.Ю. Снова о вредных условиях труда в радиологических подразделениях медицинских учреждений // Мед. радиол. 2016.

RADIATION SAFETY IN NUCLEAR MEDICINE: MODERN CONDITION AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

B. Ya. Narkevich

Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

The current state and prospects of ensuring radiation safety in Russian nuclear medicine units are analyzed. Literature data and main results of our own research over the past 15 years on ensuring radiation safety of patients, personnel, individuals from the population and the environment in radionuclide diagnostic units and radionuclide therapy are given. The most important and demanding problems for ensuring radiation safety in nuclear medicine are considered. The analysis of the normative documentation in force in the specified area in Russia is carried out and offers on its perfection are submitted.

Key words: *word, word, word*

E-mail: narvik@yandex.ru