

Б.Я. Наркевич^{1,2}

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ: Сообщение I. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

¹ Ассоциация медицинских физиков России, Москва² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ, Москва

Контактные лица: Наркевич Борис Ярославович: narvik@yandex.ru

РЕФЕРАТ

Рассмотрено современное состояние обеспечения радиационной безопасности ядерной медицины в радиологических клиниках России. Проанализированы литературные данные по обеспечению радиационной безопасности пациентов, персонала, отдельных лиц из населения и окружающей среды в подразделениях радионуклидной диагностики и радионуклидной терапии. Сформулированы наиболее важные и требующие своего решения проблемы по обеспечению радиационной безопасности в отечественной ядерной медицине.

Ключевые слова: *ядерная медицина, радиационная безопасность, пациенты, персонал, население, окружающая среда, актуальные проблемы*

Для цитирования: Наркевич Б.Я. Радиационная безопасность в ядерной медицине: сообщение I. Актуальные проблемы. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021;66(1):29-36.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-1-29-36

Введение

Широкое использование средств и технологий современной ядерной медицины в онкологии, кардиологии, неврологии и в других разделах клинической медицины базируется на фундаменте надежного обеспечения радиационной безопасности (РБ) пациентов, персонала, населения и окружающей среды.

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.

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 представлены 12 Публикаций МКРЗ, а также более 50 рекомендаций и докладов МАГАТЭ.

Цель Сообщения I данной работы – анализ современного состояния средств, технологий и регламентов обеспечения РБ в ядерной медицине на основе самых важных литературных данных и формулирование на этой основе наиболее актуальных проблем, настоятельно требующих адекватных решений в данной области. Легализация таких решений на официальном уровне возможна только на основе совершенствования соответствующей нормативной документации, что будет предметом Сообщения II настоящего исследования.

Обеспечение радиационной безопасности пациентов

Оптимизация активности вводимого радиофармпрепарата

В основе всех аспектов проблемы обеспечения РБ пациентов при проведении радионуклидных диагностических и терапевтических процедур лежит требование правильного определения величины активности радиофармпрепарата (РФП), вводимого в организм пациента.

В соответствии с основной концепцией медицинского облучения [1, 2], именно величина активности введенного в организм РФП обуславливает диагностическую информативность изображений при РНД, а также запланированный терапевтический эффект при минимально возможном уровне облучения пациента, в том числе без критических лучевых повреждений нормальных тканей и органов, при РНТ. В связи с развитием за последнее время концепции и различных подходов к персонализированной медицине определение активности РФП должно быть индивидуализированным как в РНД, так и, в особенности, в РНТ.

Сначала рассмотрим подходы к решению этой проблемы в РНД. Пока оптимизировать величину активности вводимого РФП в строгом смысле этого понятия не удастся вследствие принципиальной невозможности точного определения индивидуальной функции удержания того или иного диагностического РФП для конкретного пациента. Для решения этой сложной проблемы была предложена концепция так называемых референсных диагностических уровней, выражаемых в терминах вводимой активности [2, 3]. 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 РФП на одной и той же установке для разных пациентов. Ясно, что конкретные значения таких уровней сильно зависят от конкретных условий, чувствительности аппаратуры и режимов проводимых исследований, и поэтому могут носить только рекомендательный характер. В публикации МАГАТЭ [4] табулированы референсные диагностические уровни вводимой активности для 62 РНД-исследований взрослых пациентов по типовым протоколам.

Особую осторожность следует проявлять при расчете активности диагностических РФП при РНД-исследованиях детей. Если ранее такой расчет производили исходя из возраста пациента, то теперь в отечественных методических рекомендациях [5] постулируется более правильный методический подход, основанный на определении активности любого РФП исходя из отношения значений массы тела ребенка и взрослого. Однако при

этом в [5] отсутствуют: 1) указания по объективизации выбора активности для взрослого пациента, на основе которой рассчитывается и активность для ребенка; 2) дифференцировка результатов расчета по типу используемого РФП и протокола РНД-исследования именно для детей, что не позволяет определить оптимальную активность для конкретного ребенка в конкретном исследовании с тем или иным РФП. От последнего из этих недостатков избавлены рекомендации Европейской ассоциации ядерной медицины [6] и Общества ядерной медицины и молекулярной визуализации США [7]. Там эти рекомендации оформлены в виде автоматических калькуляторов, позволяя быстро рассчитать вводимую активность для 34 значений массы тела ребенка в 50 различных РНД-исследованиях [6] и для любой массы тела ребенка в 24 РНД-исследованиях [7] соответственно.

По сравнению с РНД проблема точного определения активности при РНТ еще более актуальна, несмотря на определенные достижения в области дозиметрического планирования РНТ [8]. Это, прежде всего, разработка простых и, самое главное, более точных технологий дозиметрического планирования РНТ, пригодных для рутинного клинического использования. Если при планировании внешнего дистанционного облучения онкологических больных на международном уровне регламентирована 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 чисто технологическими трудностями проведения серии измерений для определения функции удержания РФП, то есть процессов накопления и выведения диагностической активности терапевтического РФП в патологическом очаге, а также индивидуальной вариабельностью функции удержания, особенно для «чистых» бета-излучающих радионуклидов типа ^{89}Sr .

В качестве одного из возможных подходов к решению сложной задачи дозиметрического планирования РНТ, для тераностической пары радионуклидов $^{123}\text{I}/^{131}\text{I}$ была предложена методика, 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 РФП, двух-проекционной сцинтиграфии пациента после инъекции этого РФП и определении его накопления при введении рассчитанной методом Монте-Карло поправки на поглощение и рассеяние гамма-излучения ^{123}I в теле пациента и в коллиматоре гамма-камеры. Для расчета поправки была использована программа MCNP Монте-Карло-моделирования [9]. Методика была успешно апробирована при сцинтиграфическом исследовании с инъекцией 30 МБк ^{123}I -MIBG младенцу с нейробластомой [10].

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 РФП высокой активности [8].

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 РФП [11, 12]. 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 РФП на патологический процесс. Все это приводит к чрезмерно высокой общей неопределенности конечного результата дозиметрического планирования, т.е. оценки очаговой дозы внутреннего облучения при запланированной активности вводимого в организм терапевтического РФП.

Определение лучевой нагрузки на пациента

Трудности в выборе оптимальной активности вводимого в организм РФП обуславливают актуальность связанной с таким выбором проблемы оценки лучевой нагрузки на пациента при РНД и РНТ. 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 называемых функций удержания РФП в органах-источниках. Далее по значениям доз облучения всех органов-мишеней рассчитывается удельная эффективная доза на 1 МБк активности введенного РФП. Ее значения, а также значения эквивалентных доз внутреннего облучения для 19 органов у 5 возрастных групп были табулированы для 169 различных РФП в Публикациях 53, 80, 106 и 128 МКРЗ [13–16], частично продублированных в отечественных методических рекомендациях [5].

Основным достоинством такого подхода является удобство его практического применения, поскольку лучевая нагрузка на пациента вычисляется простым перемножением значений активности введенной порции РФП и табулированной удельной эффективной 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 [17]. Однако другой, физиологический сомножитель определяется путем экстраполяции фармакокинетических данных с лабораторных животных на условного человека, из-за чего его точность не соответствует статусу индивидуализированной оценки для конкретного пациента. Другой недостаток – дифференцировка значений удельной эффективной дозы только по возрастным категориям при игнорировании массы тела, пола исследуемого пациента и протокола РНД-исследований.

За последнее время появилась еще одна задача по определению лучевой нагрузки на пациента в ядерной медицине. Она связана с использованием гибридных установок ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ как для первичной диагностики патологических процессов, так и для оценки эффективности проводимого лечения и выявления рецидивов, в том числе и при РНТ. При таких исследованиях внутреннее облучение пациента от введенного в организм РФП суммируется с радиационным воздействием от внешнего облучения КТ-

сканера. Методических трудностей при этом не возникает, поскольку уже давно разработаны общепринятые рекомендации по конкретизации референсных диагностических уровней рентгеновского излучения и по расчету соответствующих значений эффективной дозы [4, 18, 19].

Радиационный риск и эффективная доза

Как известно, онкологические и сердечно-сосудистые заболевания могут с определенной, хотя и достаточно низкой вероятностью возникать у пациентов как побочный эффект лучевой терапии заболеваний, обычно онкологических. Канцерогенный эффект радиации проявляется по прошествии минимального латентного периода, составляющего от 2 до 10 лет для разных видов солидного рака, при дозе в соответствующих органах и тканях около 100 мГр и более у взрослых и несколько меньше у детей. При меньших дозах ионизирующего излучения канцерогенный эффект радиации у человека не установлен. Тем не менее, в последние годы было выявлено увеличение онкологической заболеваемости лиц, которым в детстве многократно проводили высокодозную диагностическую КТ. Эти данные послужили причиной повышения внимания к обоснованности назначения и проведения процедур лучевой диагностики и ядерной медицины.

Поэтому важнейшим критерием адекватности радиационно-гигиенического сопровождения РНД и РНТ является радиационный риск (РР) возникновения радиационно-индуцированных солидных опухолей и лейкозов, в том числе и вторичных, у онкологических больных. Особенно важно снижение РР при РНД-исследованиях детей, поскольку чем меньше возраст пациента на момент диагностического облучения, тем больше шансов у него дожить до возникновения радиационно-индуцированного канцерогенеза.

Что касается РНТ, то с клинической точки зрения не совсем корректно говорить о возникновении вторичного радиационно-индуцированного рака у тех больных с уже имеющимися метастатическими поражениями, которым проводят РНТ. Эти пациенты имеют небольшой шанс дожить до появления вторичных опухолей. Тем не менее, при реализации методов РНТ интенсивному внутреннему облучению подвергаются не только опухолевые очаги, но и другие нормальные органы и ткани, для которых угроза радиационного канцерогенеза становится вполне реальной при успешном исходе лечения основного заболевания, что обуславливает актуальность получения соответствующих оценок РР не только для РНД, но и для РНТ [20].

При дозиметрическом планировании РНТ было бы более уместным говорить о риске не радиационно-индуцированного канцерогенеза, а возникновения миелотоксичности, а также о синдромах кардио- (или) нефротоксичности, которые могут стать препятствием для проведения дальнейших курсов РНТ и (или) существенно снижают качество жизни пациента. Однако, в отличие от стохастического эффекта канцерогенеза, указанные лучевые осложнения относятся к детерминированным (пороговым) радиобиологическим эффектам, для которых вероятность возникновения и степень тяжести зависят не только от полученной дозы и мощности дозы внутреннего облучения, но и, прежде всего, от индивидуальной радиочувствительности критических органов и общего состояния организма больного. В связи с этим зависимость проявления клинически значимых лучевых осложнений от всех этих плохо формализуемых факторов обуславливает отсутствие исследований по оценке РР для подобных радиационно-индуцированных эффектов при РНТ и, тем более, отсутствие соответствующих радиационно-эпидемиологических моделей.

К настоящему времени предложено несколько радиационно-эпидемиологических моделей для оценки РР радиационного канцерогенеза, в том числе и при медицинском облучении. Наиболее известными из них являются модели РР, предложенные профильными организациями: МКРЗ, НКДАР ООН и BEIR (Комитет по биологическим эффектам ионизирующей радиации НКРЗ США – Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation). Последняя из них была использована в качестве алгоритма для автоматического калькулятора РР в рентгенорадиологических исследованиях (13 типовых процедур рентгенографии, 18 – рентгеновской КТ, 5 – рентгеноскопии, 16 – радионуклидной диагностики, 9 – интервенционной радиологии) [21], а модель МКРЗ – для отечественных методических рекомендаций по определению такого же РР [22].

Строго говоря, все эти модели предназначены для получения оценок РР в той популяции, к которой относится данный пациент, и не позволяют учитывать его (ее) индивидуальную радиочувствительность. Тем не менее, в литературе все чаще стали появляться работы, в которых данная концепция используется для прогнозирования не только популяционных, но и индивидуальных оценок РР при РНД-исследованиях как у детей [23], так и у взрослых [24]. Для РНТ пока получены лишь ретроспективные оценки уже состоявшегося радиационно-индуцированного канцерогенеза при радиойодотерапии рака щитовидной железы [25] и гипертиреоза [26], то есть не прогнозные оценки РР в строгом смысле данного понятия.

Таким образом, для определения индивидуальных значений РР в РНД-исследованиях пока отсутствует общепринятая модель, а для РНТ концепция прогнозирования РР вторичного лучевого канцерогенеза вообще не применяется и соответствующие исследования не проводятся. Однако основные трудности определения РР обусловлены даже не этими обстоятельствами, а тем, что в основе всех радиационно-эпидемиологических моделей лежит концепция эффективной дозы, которая первоначально была разработана МКРЗ для целей радиационной защиты персонала, то есть для условий хронического профессионального облучения, но стала повсеместно применяться для оценки совокупного ущерба для организма при однократном медицинском облучении человека. Данная концепция теперь подвергается жесткой критике, в которой главными аргументами является не состоятельность тканевых весовых коэффициентов для условий внутреннего облучения в ядерной медицине, а также игнорирование эффектов пространственной неравномерности и мощности дозы облучения, отсутствие дифференцировки по возрасту, полу и массе тела пациента и т.д. [27]. Было показано, что совокупное действие всех этих факторов приводит к неопределенности $\pm 50\%$ в определении эффективной дозы по сравнению с таковой для референсного пациента, а оценка РР вторичного радиационно-индуцированного рака может отличаться от реальной на 1 – 2 порядка величины [28].

В качестве альтернативы концепции эффективной дозы была предложена концепция эффективного риска, позволяющая устранить большинство из перечисленных выше недостатков. Вместо вычисления эффективной дозы предлагается в рамках этой концепции рассчитывать эффективный риск возникновения радиационно-индуцированных опухолей также как взвешенную сумму органов эквивалентных доз, но в которой вместо тканевых коэффициентов МКРЗ предлагается использовать парциальные значения РР канцерогенеза для каждого из критических органов [29]. Однако пока этот подход не нашел применения в клинической практике медицинского облучения и остается предметом дискуссий.

Оценивая ситуацию в целом, можно констатировать, что проблема точного определения значений РР в ядерной медицине еще весьма далека от своего успешного решения.

Методическое обеспечение радиационной безопасности пациентов

Помимо перечисленного выше, к актуальным проблемам следует отнести также ряд нерешенных вопросов методического обеспечения.

Прежде всего, следует отметить возрастание интереса к вопросам обеспечения РБ при РНД детей. В частности, сравнительно недавно появился журнал *Pediatric Nuclear Medicine*. При этом обращается внимание на существенно более высокую радиочувствительность у детей по сравнению с взрослыми. Данное обстоятельство и более высокая продолжительность прогнозируемого дожития в силу меньшего возраста на момент обследования обуславливают более высокие значения РР возникновения вторичных опухолей, чем у взрослых. Отсюда следует усиление важности снижения лучевой нагрузки в педиатрической РНД, особенно при гибридных исследованиях. Такое снижение может быть обеспечено только на основе оптимизации активности вводимых РФП и режимов КТ [30]. На основе данных, представленных в МАГАТЭ для 82 КТ-сканеров в 32 странах, удалось сформировать международные рекомендации по референсным диагностическим уровням для КТ-исследований детей [31]. Тем не менее, проблема снижения популяционных и индивидуальных доз облучения при РНД детей пока далека от своего исчерпывающего решения. Еще менее продвинутой остается проблема снижения РР при РНТ злокачественных опухолей у детей [32].

В современной ядерной медицине сравнительно недавно возникло принципиально новое направление – радионуклидная тераностика, представляющая собой клинически эффективный подход для комплексного решения задач терапии (тера...) и диагностики (...ностика) с использованием одного и того же биоэквивалентного нерадиоактивного предшественника, но меченного разными радионуклидами. Подобные РФП называются радионуклидными тераностическими парами. В настоящее время количество таких тераностических пар для различных опухолевых локализаций увеличивается все более возрастающим темпом. Если физико-химические и биохимические характеристики фармацевтического препарата позволяют метить его несколькими различными диагностическими и терапевтическими радионуклидами, то возникает вопрос выбора из них оптимальной тераностической пары, одновременно удовлетворяющей совокупности сразу нескольких критериев. Среди них, в соответствии с основной концепцией медицинского облучения, одним из важнейших критериев является снижение лучевой нагрузки при условии получения достоверной диагностической информации и выраженного терапевтического эффекта [1, 2]. Оптимизация тераностических пар недавно была проведена для РФП на основе простатического специфического мембранного антигена (ПСМА – PSMA) [34], но подобные работы для других опухолевых локализаций и других тераностических пар в литературе пока отсутствуют.

Еще одна проблема, ждущая своего решения, – оценка правомерности проведения РНД-исследований у беременных женщин. В настоящее время отечественными нормативными документами такие исследования запрещены, за исключением их проведения по жизненным показаниям. Однако благодаря развитию методов дозиметрии внутреннего облучения удалось показать, что для подавляющего большинства диагностических РФП доза облучения эмбриона или плода значительно ниже порога детерминированных радиобиологических эффектов, таких как эм-

бриональная смерть, врожденные дефекты или умственная отсталость, а значения РР стохастического эффекта лучевого канцерогенеза у ребенка после его рождения заведомо ниже риска для жизни матери и плода без получения клинически важной диагностической информации методами РНД [34]. Тем не менее, врачи-клиницисты неохотно назначают беременным женщинам подобные исследования, хотя почти не затрудняются при назначении, например, КТ-исследований с существенно более высокой лучевой нагрузкой. Еще более остро стоит тот же вопрос при назначении курсов РНТ беременным женщинам при отсутствии альтернативных методов лечения.

Наиболее тяжелые последствия для жизни и здоровья пациентов возникают при нарушениях РБ, связанных с несоблюдением установленных требований по обращению с РФП и радиоактивными отходами. По степени убывания степени тяжести этих последствий все инциденты можно распределить следующим образом [35, 36]: 1) введение не назначенного пациенту РФП; 2) введение назначенного РФП не по адресу, то есть другому пациенту; 3) ведение назначенного РФП с не назначенной активностью, то есть больше или меньше назначенной; в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, следует считать радиационной аварией те инциденты, когда отклонение достигает $\pm 10\%$ от назначенной активности терапевтического РФП и $\pm 50\%$ от назначенной активности диагностического РФП; 4) экстравазальное введение РФП при запланированной внутривенной инъекции; в частности, при экстравазальном введении терапевтических РФП локальные дозы облучения кожи могут достигать 180 Гр, что неизбежно вызовет образование некротической язвы в зоне поражения [37]; 5) радиоактивные загрязнения кожи пациента при нарушениях технологий введения РФП в организм и при неаккуратном мочеиспускании перед РНД-исследованием; 6) несоблюдение инструкций персонала о максимально возможном удалении от других пациентов с введенным РФП, особенно в 2-местных «активных» палатах при РНТ. Все перечисленные нарушения имеют место даже в ведущих клинических центрах, в том числе и зарубежных, и снижение их частоты также является актуальной проблемой в общем ряду мероприятий по обеспечению РБ пациентов в ядерной медицине.

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 технологических 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 МКРЗ [2, 4], МАГАТЭ [38 – 42] и в отечественных нормативных документах [43 – 46].

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.

Снижение уровней профессионального облучения

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 [1]. 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 амбиентного эквивалента дозы, а рассчитанные на его основе нормативы соответствуют по своему радиационному воздействию нормативам для «чистых» бета- и «смешанных» бета-гамма-излучателей из НРБ-99/2009 [47]. Тем не менее, данная проблема еще далека от своего точного решения, требуя расчета уровней облучения кожи в единицах индивидуального эквивалента дозы $H_p(0,07)$ с учетом эффективности дезактивации и чрескожного всасывания радиоактивности [36, 48]. Сюда же тесно примыкает проблема повышения РР появления катаракты хрусталика глаза у персонала подразделений ядерной медицины, особенно обострившаяся с все более расширяющимся использованием гибридных установок для медицинской визуализации с КТ-сканерами (ОФЭКТ/КТ и ПЭТ/КТ) [49].

Путем оптимизации режимов использования радионуклидных генераторов при РНД и РНТ можно добиться заметного снижения доз профессионального облучения. Кроме того, дополнительно можно обеспечить упорядочивание времени поступления пациентов для проведения курсов РНТ и, одновременно, экономии радиоактивного элюата, особенно при РНТ с дорогостоящими радионуклидными генераторами для получения дочерних альфа-излучающих радионуклидов [50]. И здесь требуется продолжение исследований с целью выработки унифицированных рекомендаций по работе с генераторами диагностических и терапевтических радионуклидов, которые впоследствии должны быть включены в нормативную документацию по обеспечению РБ в ядерной медицине.

Другой важной нерешенной проблемой является разработка научного обоснования оптимальных технологий профилактики и устранения последствий радиационных аварий в подразделениях ядерной медицины [35, 36]. 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, различного рода неисправности и сбои 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.

Повышение уровня профессиональной компетентности

Наконец, всегда остается «вечная» проблема кадрового обеспечения отечественной ядерной медицины. При этом здесь речь идет не столько об адекватной численности персонала в соответствующих подразделениях РНД и РНТ, сколько об уровне квалификации врачебного и среднего медицинского персонала в области обеспечения как собственной РБ, так и РБ пациентов. При подготовке врачей-радиологов в отечественных медицинских вузах и медицинских физиков в университетах не уделяется никакого внимания актуальным вопросам обеспечения РБ в медицине, и даже на курсах повышения квалификации в рамках непрерывного последилового образования эти вопросы практически не рассматриваются. 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. Следует отметить также, что и в зарубежных радиологических клиниках имеет место та же самая проблема недостаточной компетентности персонала в области РБ [4, 51].

Низкий уровень компетентности персонала в области РБ имеет своим непосредственным последствием неумение, и даже невозможность правильно информировать пациента о пользе той или иной ядерно-медицинской процедуры, о полученной дозе медицинского облучения и об уровне ее РР. Особенно это проявляется при общении с пациентами, которым назначены те или иные РНД-исследования и которые опасаются именно этих процедур, но не боятся рентгеновской КТ со значительно более высокой лучевой нагрузкой. С учетом полного отсутствия радиационно-гигиенической грамотности населения и повсеместной радиофобии по отношению именно к этим процедурам общение с такими пациентами требует не только соблюдения правил общей деонтологии и педагогических навыков, но и высокой профессиональной подготовки в области РБ. Особую сложность представляет собой процесс взаимодействия с родителями ребенка, которому назначена та или иная ядерно-медицинская процедура [52]. Следует надеяться, что такое взаимодействие может быть облегчено на основе использования опубликованного в нашем журнале глоссария адаптированных терминов ядерной медицины [53].

Обеспечение радиационной безопасности отдельных лиц из населения и окружающей среды**Обращение с жидкими радиоактивными отходами при радионуклидной диагностике**

Данному направлению профильные международные организации уделяют все более возрастающее внимание. Если в основополагающей Публикации 60 от 1990 года [54] МКРЗ декларировала в качестве основных принципов использования источников ионизирующих излучений обоснованность, оптимизацию и нормирование, то в такой же Публикации 103 от 2007 года [55] 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 практическими рекомендациями представлены в публикациях МАГАТЭ [3, 4, 56 – 60].

В соответствии с международными рекомендациями и с отечественным нормативным документом МУ 2.6.1.1892–04 [43] 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 такой ситуации, в документ [43] был включен пункт 3.14.5 об отсутствии необходимости сбора и выдержки на распаде жидких радиоактивных отходов в подразделениях РНД, поскольку при их сбросе непосредственно в хозяйственно-бытовую канализацию обеспечивается выполнение всех соответствующих нормативов как по РБ отдельных лиц из населения, так и по охране окружающей среды от радиоактивных загрязнений.

Обеспечение радиационной безопасности отдельных лиц из населения

Однако при выписке пациентов из подразделений РНТ необходимо обеспечивать РБ отдельных лиц из населения, контактирующих с такими пациентами. Соответствующие международные рекомендации содержатся в Докладе 1417 МАГАТЭ [60] и Публикации 94 МКРЗ [61], а отечественные требования – в НРБ-99/2009 [1] и СанПиН 2.6.1.2135–06 [44]. В нормативном документе [1] приведены ограничения по мощности дозы гамма-излучения от тела пациента после курсов РНТ с РФП, меченными 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 РФП, меченных одним из 4 «чистых» бета-излучающих радионуклидов, 19 «смешанных» бета-гамма-излучающих или 6 «смешанных» 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 выписки из отделения РНТ. На основе пределов доз, установленных в НРБ-99/2009, были вычислены максимально допустимые активности указанных радионуклидов для 3 различных геометрий и 8 сценариев облучения указанных лиц. Показано, что даже для наиболее консервативных условий облучения госпитализации подлежат больные, проходящие курсы РНТ только с радионуклидами ^{111}In и ^{131}I , хотя больные гипертиреозом при определенных условиях могут проходить радиойодотерапию и без госпитализации. Из остальных 27 радионуклидов для 13 показан режим однодневного стационара (4 – 5 часов пребывания в стационаре с 2-кратным мочеиспусканием), а еще для 14 – амбулаторный режим лечения без ожидания в стационаре [62]. Отметим, что в проекте новой версии НРБ к указанным выше 3 радионуклидам добавлены еще 5 (^{67}Cu , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{177}Lu , ^{223}Ra и ^{225}Ac), но другие терапевтические радионуклиды не рассмотрены [63].

Обращение с жидкими радиоактивными отходами при радионуклидной терапии

Как известно, в 2013 г. была официально принята и утверждена новая версия главного нормативного документа в области РБ в целом и окружающей среды в частности – ОСПОРБ-99/2010 [64]. 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 161 раз, что было подвергнуто вполне обоснованной критике [65]. Тем не менее, данный норматив вступил в силу, из-за чего при проектировании станций спецочистки для подразделений РНТ отечественных радиологических клиник возникли определенные трудности. Для действующих подразделений РНТ это обуславливает необходимость модернизации станций спецочистки путем монтажа новых дополнительных баков, в которых отходы будут находиться на распаде существенно более продолжительное время (до 4 месяцев), чем ранее. При невозможности же такого монтажа (отсутствие финансирования, ограниченность рабочей площади станции) придется снижать поток пролечиваемых больных. Возрастание продолжительности выдержки на распад приведет к неоправданному увеличению дозы профессионального облучения персонала, занятого эксплуатацией станции спецочистки жидких радиоактивных отходов, вследствие более продолжительного времени контакта персонала с системой спецканализации.

Катастрофическое ужесточение норматива по сбросу ^{131}I в нормативном документе [65] сразу в 161 раз не имеет никакого внятного научного обоснования. Решение об ужесточении нормативов для жидких радиоактивных отходов ведет к совершенно неоправданному экономическим затратам и (или) к снижению пропускной способности отделений РНТ без какого-либо повышения уровня РБ для населения и окружающей среды, но со снижением того же уровня для персонала.

С целью облегчения проектирования подразделений РНТ в этих условиях 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 РФП из организма больного, а также накопления и выдержки на распад жидких радиоактивных отходов в баках-накопителях станции с учетом потока госпитализируемых больных [66].

Заключение

Анализ современного состояния проблемы обеспечения РБ в отечественной ядерной медицине показывает, что в целом уже разработанные ранее технологии, средства, организационные мероприятия и нормативные документы, в принципе, гарантируют достаточный уровень радиационной защиты пациентов, персонала, населения и окружающей среды при проведении любых диагностических и терапевтических процедур со всеми известными РФП. Тем не менее, в этой области еще остается целый ряд актуальных вопросов, настоятельно требующих своего решения на основе дальнейшего развития научных исследований в области радиационной гигиены, накопления, анализа и обобщения практического опыта по обеспечению РБ в подразделениях ядерной медицины.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Поступила: 02.07.2020. Принята к публикации: ???.???.202?.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Article received: 02.07.2020. Accepted for publication: 23.12.2020.

Radiation Safety in Nuclear Medicine: Report I. Topical Problems

B.Ya. Narkevich^{1,2}

¹ Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

² N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

Contact person: Boris Yaroslavovich Narkevich: narvik@yandex.ru

ABSTRACT

The current state and prospects of ensuring radiation safety in the nuclear medicine divisions of Russia are analyzed. The literature data and the main results of our own research to ensure the radiation safety of patients, staff, caregivers and the environment in the departments of radionuclide diagnostics and radionuclide therapy are presented. The most important and requiring solutions to ensure radiation safety in nuclear medicine are considered.

Keywords: nuclear medicine, radiation safety, patients, personnel, population, environment, topical problems

For citation: Narkevich B.Ya. Radiation Safety in Nuclear Medicine: Report I. Topical Problems. Medical Radiology and Radiation Safety 2021;66(1):29-36.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-1-29-36

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCE

- СанПиН 2.6.1.2523 – 09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы. 2009. [СанПиН 2.6.1.2523 - 09. Radiation Safety Standards NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations. 2009. (In Russian)].
- Публикация 105 МКРЗ. Радиационная защита в медицине. Пер. с англ. С.-Петербург: 2011. [ICRP Publication 105. Radiation Protection in Medicine. 2007. (In Russian)].
- Applying of Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine. Safety Reports Series No. 40. IAEA. Vienna. 2005.
- Радиологическая защита при медицинском облучении ионизирующим излучением. Серия норм безопасности, № RS-G-1.5. Пер. с англ. МАГАТЭ. Вена. 2004. [Radiological Protection Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation. Safety Standards Series, No. RS-G-1.5. IAEA. Vienna. 2004. (In Russian)].
- МУ 2.6.1.3151–13. Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований. Методические указания. М. 2014. [MU 2.6.1.3151–13. Evaluation and Accounting of Effective Doses in Patients During Radionuclide Diagnostic Studies. Guidelines. M. 2014. (In Russian)].
- <https://www.eanm.org/publications/dosage-calculator/>
- <http://www.snmml.org/clinicalpractice/pediatrictool.aspx>
- Sapienza MT, Willegaignon J. Radionuclide therapy: current status and prospects for internal dosimetry in individualized therapeutic planning. Clinics. 2019;74:e835. DOI: 10.6061/clinics/2019/e835
- Лысак ЮВ, Климанов ВА, Наркевич БЯ. Количественная сцинтиграфия для контроля доз внутреннего облучения патологических очагов при радионуклидной терапии. Медицинская физика. 2016; (4): 63-71. [Lysak SE, Klimanov VA, Narkevich BYa. Quantitative scintigraphy to control doses of internal exposure to pathological foci during radionuclide therapy. Medical Physycs. 2016; (4): 63-71. (In Russian)].
- Лысак ЮВ, Гончаров МО, Наркевич БЯ, Ширяев СВ. Применение метода Монте-Карло для повышения точности дозиметрического планирования радионуклидной терапии. Мед. радиол. и радиац. безопасность. 2017; 62(1): 49-55. [Lysak SE, Goncharov MO, Narkevich BY, Shiryayev SV. Application of the Monte Carlo method to improve the accuracy of dosimetric planning of radionuclide therapy. Medical Radiology and Radiation Safety. 2017; 62 (1): 49-55. (In Russian)].
- Mango L. Dose-Response Correlation is Possible in Radioiodine Therapy of Hyperthyroidism. Arch Radiol. 2019; 2(2):28-30.
- Chiesa C, Gleisne KS, Flux G, Gear J, Walrand S, et al. The conflict between treatment optimization and registration of radiopharmaceuticals with fixed activity posology in oncological nuclear medicine therapy. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2017. DOI: 10.1007/s00259-017-3707-3.
- ICRP Publication 53. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. Ann ICRP.1987; 18(1-4).
- ICRP Publication 80. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. Addendum to ICRP 53. Ann ICRP. 1998; 28(3).
- ICRP Publication 106. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. A Third Amendment to ICRP 53. Ann ICRP. 2008; 38(1-2).
- ICRP Publication 128. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals. A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. Ann ICRP. 2015. 44(2S).
- ICRP Publication 110. Adult Reference Computational Phantoms. Ann ICRP. 2009; 39(2).
- Mercuri M, Rehani MM, Einstein AJ. Tracking patient radiation exposure: challenges to integrating nuclear medicine with other modalities. J Nucl Cardiol. 2012 Oct; 19(5): 895-900.DOI: 10.1007/s12350-012-9586-x.
- ICRP Publication 135. Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging. Ann ICRP. 2017; 46(1).
- ICRP Publication 140. Radiological Protection in Therapy with Radiopharmaceuticals. Ann. ICRP. 2019; 48(1).
- https://www.xrayrisk.com/calculator/select_study.php?id=35
- MP 2.6.1.0098–15. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований. Методические рекомендации. М. 2012. [MP 2.6.1.0098-15. Assessment of Radiation Risk in Patients During Radiological Studies. Guidelines. M. 2012. (In Russian)].
- Alessio AM, Kinahan PE, Manchanda V, Ghioni V, Aldape L, Parisi MT. Weight-Based, Low-Dose Pediatric Whole-Body PET/CT Protocols. J Nucl Med. 2009; 50:1570-8. DOI: 10.2967/jnumed.109.065912.
- Huang B, Wai-Ming M, Khong P-L. Whole-Body PET/CT Scanning: Estimation of Radiation Dose and Cancer Risk. Radiology. 2009 April; 251(1): 166-74. <http://radiology.rsna.org/cgi/content/full/2511081300/DC1>.
- Iyer NG, Morris LGT, Tuttle RM, Shaha AR, Ganly I. Rising Incidence of Second Cancers in Patients With Low-Risk (T₁N₀) Thyroid Cancer Who Receive Radioactive Iodine Therapy. Cancer. 2011 October 1; 117(19): 4439-46. DOI:10.1002/cncr.26070.
- Hieu TT, Russell AW, Cuneo R, Clark J, Kron T, Hall P, Doi SAR. Cancer risk after medical exposure to radioactive iodine in benign thyroid diseases: a meta-analysis. Endocrine-Related Cancer. 2012; 19: 645-55. DOI: 10.1530/ERC-12-0176.
- Fisher DR, Fahey FH. Appropriate Use of Effective Dose in Radiation Protection and Risk Assessment. Health Phys. 2017 August; 113(2): 102–109. DOI:10.1097/HP.0000000000000674.
- Martin CJ. Effective dose: practice, purpose and pitfalls for nuclear medicine. J Radiol Pract. 2011 Jun;31(2):205-19.DOI: 10.1088/0952-4746/31/2/001.
- Brenner DJ. We can do better than effective dose for estimating or comparing low-dose radiation risk. Ann ICRP. 2012; 41(3/4):124-8.
- Fahey FH, Treves ST, Adelstein SJ. Minimizing and Communicating Radiation Risk in Pediatric Nuclear Medicine. J Nucl Med Technol 2012; 40:13-24. DOI: 10.2967/jnumed.109.069609.

31. Vassileva J, Rehani M. Patient grouping for dose surveys and establishment of diagnostic reference levels in paediatric computed tomography. *Radiat Prot Dosimetry*. 2015 Jul;165(1-4):81-5. DOI: 10.1093/rpd/ncv113.
32. Schmidt M, Baum RP, Simon T, Howman-Giles R. Therapeutic nuclear medicine in pediatric malignancy. *Q J Nucl Med Mol Imaging*. 2010; 54: 411-28. <https://www.researchgate.net/publication/46170520>.
33. Наркевич БЯ, Долгушин МБ, Крылов ВВ, Мещерякова НА, Кочетова ТЮ. Радиационно-гигиеническое обеспечения радионуклидной терапии рака предстательной железы. *Медицинская физика*. 2020; (1): -. [Narkevich BYa, Dolgushin MB, Krylov VV, Meshcheryakova NA, Kochetova TU. Radiation-hygienic provision of radionuclide theranostics of prostate cancer. *Medical Physics*. 2020; (1): -. (In Russian)].
34. Zanotti-Fregonara P, Hindie E. Performing nuclear medicine examinations in pregnant women. *Physica Medica*. 2017; 43:159-64. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2017.05.043>.
35. Martin CJ, Marengo M, Vassileva J, Giammarile F, Poli GL, Marks P. Guidance on prevention of unintended and accidental radiation exposures in nuclear medicine. *J Radiol Protection*. 2019; 39(3): 43-51.
36. ISO 7503-2. Measurement of radioactivity. Measurement and evaluation of surface contamination. Part 2. 2016.
37. Лысак ЮВ, Наркевич БЯ, Рыжов СА. Экстравазальное введение терапевтических радиофармпрепаратов. *Медицинская физика* 2019; (4):46-51. [Lysak YuV, Narkevich BYa, Ryzhov SA. Extravasation of therapeutic radiopharmaceuticals. *Medical Physics* 2019; (4): 46-51. (In Russian)].
38. Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: PET/CT. Safety Reports Series No. 58. IAEA. Vienna. 2008.
39. Occupational Radiation Protection Series: IAEA Safety Standards Series, 2018. Vienna. ISSN 1020-525X; no. GSG-7.
40. Predisposal management of radioactive waste from nuclear power plants and research reactors. Series: IAEA Safety Standards Series, 2016. Vienna. ISSN 1020-525X; no. SSG-40.
41. Основополагающие принципы безопасности. Серия норм безопасности. Пер. с англ. 2015. № SF-1 [Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards IAEA Safety Standards Series, 2014. Vienna; no. GSR Part 3. (In Russian)].
42. Methods for Assessing Occupational Radiation Doses due to Intakes of Radionuclides. Safety Reports Series No. 37. 2004. IAEA. Vienna.
43. МУ 2.6.1.1892-04. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики с помощью радиофармпрепаратов. [МУ 2.6.1.1892-04. Hygienic requirements for ensuring radiation safety during radionuclide diagnostics using radiopharmaceuticals. (In Russian)].
44. СанПиН 2.6.1.2368-08. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при проведении лучевой терапии с помощью открытых радионуклидных источников. [SanPiN 2.6.1.2368-08. Hygienic requirements for ensuring radiation safety during radiation therapy using open radionuclide sources. (In Russian)].
45. СанПиН 2.6.1.3288-15. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии. [SanPiN 2.6.1.3288-15. Hygienic requirements for ensuring radiation safety in the preparation and conduct of positron emission tomography. (In Russian)].
46. МУ 2.6.1.2808-10. Обеспечение радиационной безопасности при проведении радионуклидной диагностики методами радиоиммунного анализа *in vitro*. [МУ 2.6.1.2808-10. Ensuring radiation safety during radionuclide diagnostics using in vitro radioimmunoassay methods. (In Russian)].
47. Наркевич БЯ, Малаева НС, Зиновьева НП. Радиоактивная загрязненность рабочих поверхностей «чистыми» гамма-излучателями: Концепция и технология нормирования. *Медицинская физика* 2000; (8): 40-7. [Narkevich BYa, Malaeva NS, Zinovieva NP. Radioactive contamination surfaces with "clean" gamma emitters: Concept and standardization technology. *Medical Physics* 2000; (8): 40-7. (In Russian)].
48. Covens P, Berus D, Cavelliers V, Struelens L, Verellen D. Skin contamination of nuclear medicine technologists: incidence, routes, dosimetry and decontamination. *Nucl Med Commun*. 2012 Oct; 33(10):1024-31. DOI:10.1097/MNM.0b013e32835674d9.
49. Bernier MO, Journy N, Villouing D, et al. Cataract Risk in a Cohort of U.S. Radiologic Technologists Performing Nuclear Medicine Procedures. *Radiology*. 2018 February; 286(2): 592-601.
50. Наркевич БЯ, Лысак ЮВ. Оптимизация использования радионуклидных генераторов в ядерной медицине. *Медицинская физика*. 2018; (1): 89-95. [Narkevich BYa, Lysak YuV. Optimization of the use of radionuclide generators in nuclear medicine. *Medical Physics*. 2018; (1): 89-95. (In Russian)].
51. Krille L, Hammer GP, Merzenich H, Zeeb H. Systematic review on physician's knowledge about radiation doses and radiation risks of computed tomography. *Eur J Radiol*. 2010 Oct;76(1):36-41. DOI: 10.1016/j.ejrad.2010.08.025.
52. Kasraie N, Jordan D, Keup Ch, Westra S. Optimizing Communication with Parents on Benefits and Radiation Risks in Pediatric Imaging. *J Am Coll Radiol* 2018; 15(5):1-9. DOI: 10.1016/j.jacr.2018.01.032
53. Наркевич БЯ, Хмелев АВ, Крылов ВВ, Кочетова ТЮ. Разработка краткого словаря по ядерной медицине. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2020; 65(2): 68-81. [Narkevich BYa, Khmelev AV, Krylov VV, Kochetova TYU. Development of the concise vocabulary in nuclear medicine. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2020; 65 (2): 68-81. (In Russian)].
54. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP*. 1990; 21(1-3).
55. Публикация 103 МКРЗ. Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите. Пер. с англ. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана». 2009. 344 с. [ICRP Publication 103. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.. *Ann. ICRP* 2007; 37(2-4). (In Russian)].
56. Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной защиты. Пер. с англ. 2016. МАГАТЭ, Вена. [Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection Safety Guide. no. RS-G-1.8. 2015. IAEA, Vienna. (In Russian)].
57. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiation. Series: IAEA Safety Standards Series. 2018. IAEA. Vienna. ISSN 1020-525X; no. SSG-46.
58. Радиационный контроль радиоактивных сбросов в окружающую среду. Пер. с англ. 2005. МАГАТЭ, Вена. [Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. Safety Guide no. WS-G-2.3. 2004. IAEA. Vienna. (In Russian)].
59. Classification of Radioactive Waste: Safety Guide. Safety Standards Series No. no. GSG-1. IAEA. Vienna. 2009.
60. Release of Patients after Radionuclide Therapy. Safety Reports Series No.63. IAEA. Vienna. 2009.
61. ICRP Publication 94. Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides. *Ann. ICRP*. Vol. 34. № 2.
62. Наркевич БЯ, Ширяев СВ, Клепов АН, Липанова НН, Лысак ЮВ. Радиационно-гигиеническое обоснование радионуклидной терапии в амбулаторном режиме. *Радиационная гигиена*. 2014; 7(2): 47-58. [Narkevich BYa, Shiryayev SV, Klepov AN, Lipanova NN, Lysak YuV. Radiation-hygienic substantiation of radionuclide therapy on an outpatient basis. *Radiation Hygiene*. 2014; 7 (2): 47-58. (In Russian)].
63. Заключение Российской научной комиссии по радиологической защите по результатам заседания 13 мая 2019 г. Радиация и риск. 2019; 28(2):5-7. [Conclusion of the Russian Scientific Commission on Radiological Protection based on the results of the meeting on May 13, 2019. *Radiation and Risk*. 2019; 28 (2): 5-7. (In Russian)].
64. 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). [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety OSPORB-99/2010. SP 2.6.1.2612-10. (As amended by No. 1, approved by the Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 43 of September 16, 2013). (In Russian)].
65. Наркевич БЯ, Ширяев СВ, Крылов ВВ. Повышает ли новая версия ОСПОРБ-99/2009 уровень радиационной безопасности в медицине? *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2015; 60(6):5-9. [Narkevich BY, Shiryayev SV, Krylov VV. Does the new version of OSPORB-99/2009 increase the level of radiation safety in medicine? *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2015; 60(6): 5-9. (In Russian)].
66. Наркевич БЯ, Лысак ЮВ, Коновалов ИС, Ширяев СВ, Крылов ВВ. Расчетные исследования проектной мощности станции очистки жидких радиоактивных отходов в подразделениях радионуклидной терапии. *Медицинская физика*. 2015; (4):60-8. [Narkevich BYa, Lysak YuV, Kononov IS, Shiryayev SV, Krylov VV. Computational studies of the design capacity of a liquid radioactive waste treatment station in radionuclide therapy units. *Medical Physics*. 2015; (4): 60-8. (In Russian)].