

**Б.Я. Наркевич^{1,2}, В.А. Костылев², А.В. Левчук^{2,3}, Б.И. Долгушин¹,
С.И. Ткачев¹, С.В. Ширяев¹**

**РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МЕДИЦИНСКОЙ
РАДИОЛОГИИ.**

Часть 2. Обеспечение радиационной безопасности пациентов

**B. Ja. Narkevich^{1,2}, V.A. Kostylev², A.V. Levchuk^{2,3}, B.I. Dolgushin¹,
S.I. Tkachev¹, S.V. Shiryaev¹**

Radiation Safety in Medical Radiology.

Part 2. Radiation Safety of Patients

РЕФЕРАТ

Цель: Систематизировать и сформулировать основные положения и рекомендации по обеспечению радиационной безопасности в медицинской радиологии.

Материал и методы: Проанализированы отечественные и международные нормативные документы и рекомендации по обеспечению радиационной безопасности при проведении лечебных и диагностических процедур с использованием средств и технологий лучевой терапии, ядерной медицины, рентгенодиагностики и интервенционной радиологии. Обобщены литературные данные и собственный практический опыт по обеспечению радиационной защиты пациентов, персонала, населения и окружающей среды при реализации высоких радиологических технологий.

Результаты: Конкретизированы требования и рекомендации по обеспечению радиационной безопасности пациентов при проведении процедур лучевой терапии, ядерной медицины, рентгенодиагностики и интервенционной радиологии. Рассмотрены и сформулированы рекомендации по организации технологических процессов, обеспечивающей максимальную эффективность лечения и диагностики при минимально возможном уровне облучения пациентов.

Выводы: Представленный материал будет полезен для проектировщиков радиологических корпусов, контролирующих органов Ростехнадзора и Роспотребнадзора, администрации радиологических и онкологических клиник, врачебного и инженерного персонала подразделений лучевой терапии, ядерной медицины, рентгенодиагностики и интервенционной радиологии.

Ключевые слова: *радиационная безопасность, медицинская радиология, пациенты*

ABSTRACT

Purpose: To systematize and to formulate the basic demands and recommendations for maintenance of radiation safety in medical radiology.

Material and methods: The domestic and international regulative documents and recommendations for maintenance of radiation safety are analyzed at realization of medical and diagnostic procedures with use of means and technologies of radiation therapy, nuclear medicine, diagnostic radiology and intervention radiology. The literature data and own practical experience on maintenance of radiation protection of the patients, staff, population and environment are generalized at realization of high radiological technologies.

Results: The requirements and recommendations for maintenance of radiation safety of the patients are detailed at realization of procedures of radiation therapy, nuclear medicine, diagnostic radiology and intervention radiology. The recommendations for organization of technological processes by criterion of reception of the greatest possible efficiency of treatment and diagnostics are considered and formulated at minimal possible level of an irradiation of the patients.

Conclusions: The submitted material will be useful to the designers of radiological buildings, administration of radiology and oncology clinics, personnel of divisions of radiation therapy, nuclear medicine, diagnostic radiology and intervention radiology.

Keywords: *radiation safety, medical radiology, patients*

¹ ГУ Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН, 115478 Москва, Каширское ш. 24

² Институт медицинской физики и инженерии, 115478 Москва, Каширское ш. 24

³ Московский отдел инспекций радиационной безопасности Центрального межрегионального территориального округа по надзору за ядерной и радиационной безопасностью Ростехнадзора, Москва

¹ N.N. Blokhin Russian Cancer Research Center of RAMS, Lab. of Nuclear Medicine, 24 Kashirskoe highway, 115478 Moscow, Russia

² Institute of Medical Physics and Engineering, 24 Kashirskoe highway, 115478 Moscow, Russia

Введение

В основе нормирования радиационного воздействия лежит концепция ограничения дозы облучения человека, базирующаяся на приемлемом радиационном риске и на данных о фоновом облучении человека. В рамках этой концепции, нормирование облучения человека осуществляется по следующим трем основным принципам:

- *Принципу нормирования* – не превышения допустимых пределов индивидуальных доз облучения человека от всех источников излучения.
- *Принципу обоснования* – запрещения всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых польза для человека и общества в целом не превышает риск вреда от дополнительного облучения.
- *Принципу оптимизации* – поддержания индивидуальных доз облучения и количества облучаемых людей на самом низком из практически возможных уровней, с учетом экономических и социальных факторов.

Все эти принципы распространяются на любое облучение человека, но их практическая реализация имеет свою специфику при облучении в медицинских целях.

В официальных рекомендациях МКРЗ (Публикация 60) установлены следующие три основных принципа регламентации лучевых нагрузок: 1) эффективная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендованного МКРЗ для конкретных условий облучения; 2) никакой вид использования источников ионизирующих излучений не должен вводиться в практику, если он не приносит реальной пользы, т.е. практическая деятельность с этими источниками должна быть оправданной; 3) все дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие только можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов, т.е. необходима оптимизация радиационной защиты.

Третий принцип в зарубежной литературе и практике известен как принцип ALARA (аббревиатура из начальных букв в выражении As Low As Reasonable Achievable). Он следует из признания беспороговой зависимости “доза–эффект” в области малых доз, характерных для реальных уровней облучения персонала и населения. Фактически он означает приемлемость оправданного риска от облучения в малых дозах.

Для количественной реализации второго и третьего принципов МКРЗ рекомендует использовать концепцию максимизации отношения *польза/затраты*. Согласно этой концепции, принимаемые меры радиационной безопасности следует счи-

тать оптимальными, если они приводят к максимальному значению чистой пользы. Однако практическое применение этой концепции очень часто наталкивается на значительные, а иногда принципиально непреодолимые трудности. Если затраты можно достаточно легко посчитать в денежном эквиваленте, то реальная польза часто не может быть оценена в тех же единицах. Это относится особенно к медицинскому облучению, непосредственно воздействующему на состояние здоровья облучаемого пациента или позволяющему получить необходимую для лечения диагностическую информацию.

Принципы нормирования, обоснования и оптимизации радиационных воздействий в медицине реализуются на основе важнейшей концепции *получения необходимой и полезной диагностической информации или выраженного терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения пациента*. Если в ранее принятых нормативных документах приводились предельно допустимые дозы для некоторых медицинских радиологических процедур, в частности при рентгенодиагностике и радионуклидной диагностике (РНД), то в НРБ-99 в соответствии с рекомендациями МКРЗ подчеркивается, что пределы доз медицинского облучения не устанавливаются в принципе. Это означает, что при планировании и выполнении любой диагностической или терапевтической радиологической процедуры приоритет отдается не снижению уровня облучения, а получению чисто медицинского эффекта (основное, т.е. первичное, требование), но при минимально возможной лучевой нагрузке на пациента (дополнительное, т.е. вторичное, требование).

Лучевая терапия

Принцип обоснованности облучения в лучевой терапии реализуется на основе профессионального решения радиационного онколога (лучевого терапевта) о необходимости проведения конкретному больному индивидуально спланированного терапевтического облучения для достижения клинически выраженного улучшения состояния его здоровья. При этом риск от проведения лучевой терапии должен быть заведомо ниже риска от альтернативных (нерадиационных) методов лечения и, тем более, ниже риска отказа от лечения вообще. Решение о проведении лучевой терапии должно приниматься консилиумом в составе радиационного онколога, лучевого терапевта и лечащего врача.

Вторым принципом системы ограничения дозы является оптимизация радиационной защиты больного, что реализуется посредством взаимосвя-

занного совместного выбора адекватной дозы облучения злокачественной опухоли и толерантных доз облучения нормальных тканей организма. Не менее важным элементом оптимизации защиты больного при лучевой терапии является проектирование, эксплуатация и поддержание средств и технологий терапевтического облучения на таком уровне, который обеспечивает оптимальное соотношение между эффективным подавлением злокачественного роста тканей и минимально возможным проявлением лучевых осложнений. В более широком смысле проблема обеспечения РБ больного предусматривает необходимость специально-медицинского и радиационно-физического образования персонала, наличия практических навыков и клинического опыта проведения радиационно-терапевтических процедур, адекватного использования радиационных аппаратов и оборудования с современными физико-техническими характеристиками, а также тщательной регистрации непосредственных и отдаленных результатов облучения.

Принцип нормирования дозы в лучевой терапии не применяется, т.к. все облучение направлено на пользу для здоровья пациента.

Оптимальное облучение больного связано с наиболее разумным использованием ионизирующего излучения. Существует два вида риска для больного: первый и самый важный — это риск ошибки в радиационном воздействии на опухоль, когда суммарная доза может оказаться выше смертельной дозы для больного. Второй риск определяется вредностью излучения для нормальных тканей. Лучевая терапия всегда связана с некоторым риском, но риск становится чрезмерным, если суммарная доза облучения, даже с учетом фракционирования, слишком велика или слишком велика радиочувствительность и объем облучаемых нормальных тканей.

На основе многолетнего клинического опыта накоплены достоверные данные о терапевтических дозах облучения и толерантных дозах облучения окружающих опухоль нормальных тканей. Это позволило математически смоделировать или сформировать непосредственно по таким клиническим данным зависимости “доза—эффект” для злокачественных опухолей различной локализации и разных гистологических характеристик, на основе чего были определены соответствующие значения так называемых терапевтических интервалов.

Обеспечение РБ больного при лучевой терапии практически полностью определяется системой гарантии качества облучения, используемой в данном медицинском учреждении. В свою очередь, гарантия качества базируется на тщательном выполнении тре-

бований к точности подведения дозы и контролю радиационно-физических характеристик применяемых аппаратов и оборудования.

Требования к точности подведения дозы меняются в зависимости от цели облучения. К детальному планированию облучения в больших терапевтических дозах, близких к толерантным дозам для нормальных тканей, предъявляются повышенные требования. При этом наибольшая точность требуется при облучении большими дозами мишеней, соседних с критическими по радиочувствительности нормальными тканями. При паллиативном облучении применяются меньшие дозы и требования к точности дозирования могут быть несколько снижены.

По достоверным статистическим данным, даже в современных зарубежных радиационно-терапевтических центрах у 3–4 % больных наблюдаются отклонения суммарной очаговой дозы в опухоли за полный курс облучения на 5 % и более вследствие случайных и систематических ошибок и погрешностей. Сюда входят технические и технологические неточности: погрешности топографии, дозиметрического планирования, повседневные ошибки позиционирования тела больного, наведения пучка излучения, стабильности параметров радиационного поля и т.д. Есть также ошибки, связанные непосредственно с самим облучаемым больным. К ним относятся погрешности определения положения мишени и окружающих ее органов и тканей, учета формы поверхности тела и его гетерогенности при расчетах дозовых распределений, а также погрешности, связанные с изменением положением кожных меток и маркеров на теле больного, с изменением размеров и формы его тела и органов, с недостаточной фиксацией тела пациента при облучении, со спонтанными смещениями тканей и органов в курсе облучения (например, вследствие дыхания, перистальтики кишечника) и т.д.

Точность измерений дозы зависит от качества используемых приборов и точности их дозовой калибровки. При внешнем облучении дозы облучения в опорных точках при референсных условиях должны быть измерены с погрешностью не более $\pm 3\%$. Измерения глубинных доз, коэффициентов ослабления клиновидных фильтров и подставок для блоков должны выполняться с погрешностью не более 0,5–1,0 %. При этом дозиметры для контроля заданной дозы в объеме мишени следует периодически калибровать через определенные интервалы времени по вторичному эталону, который, в свою очередь, калибруется по национальному или международному первичному эталону.

При внутритканевом или внутрисполостном облучении погрешность измерений мощности дозы не

должна превышать $\pm 5\%$. Активность следует измерять при получении нового источника. Если имплантируется группа источников небольшой активности, например, при внутритканевом облучении рака предстательной железы гранулами ^{125}I , общую активность нужно знать с погрешностью не более $\pm 5\%$, а активности отдельных источников не должны отличаться более чем на 10% .

Задача планирования облучения заключается в таком управлении облучением, при котором поглощенная доза в объеме мишени в соответствии с рекомендациями ВОЗ, МКРЗ и МАГАТЭ соответствовала бы в пределах 5% заданной дозе и в то же время доза в окружающих нормальных тканях получалась минимальной.

Анатомические данные о конкретном больном для планирования его облучения следует определять при нахождении тела пациента в предполагаемом положении облучения. Для топографии предпочтительнее использовать компьютерные томографы-симуляторы как обеспечивающие более высокую точность, чем конвенциональные рентгеновские симуляторы. В области черепа контуры тела можно определять с погрешностью менее $2\text{--}3\text{ мм}$, а в области живота – менее 10 мм , однако контуры тела могут меняться во время сеанса облучения. Если во время курса облучения возникает подозрение на значительное изменение контуров тела, например, в результате регрессии опухоли или резкого уменьшения массы тела пациента, контуры следует определить снова и соответственно откорректировать дозиметрический план.

Перед началом курса лучевой терапии необходимо проверить, по крайней мере, максимальную и минимальную дозы в объеме мишени, а также дозы, которые будут подведены к наиболее радиочувствительным тканям, где высока вероятность возникновения лучевых осложнений. При каждом сеансе облучения следует регистрировать суммарные дозы и независимо контролировать их через определенные промежутки времени.

При дистанционном облучении больного его укладка на ложе радиационно-терапевтического аппарата должна соответствовать укладке на симуляторе облучения и быть воспроизводимой в последующих сеансах облучения. Больной должен находиться в удобном положении и быть максимально неподвижным при облучении. В этих целях следует использовать специальные приспособления для иммобилизации больного, которые теперь уже изготавливают в индивидуальном порядке по данным топографии. Если положение больного изменяется, облучение должно быть немедленно прервано и позиционирование больного нужно выполнять заново.

Если даже план облучения не предусматривает учета особого риска клинически значимых доз облучения нормальных органов и тканей, желательно провести *in vivo* дозиметрические измерения в ходе первого или нескольких начальных сеансов облучения. Тогда можно оценить реальные дозы облучения критических органов, в первую очередь, кожи, и сравнить их с запланированными значениями. При заметном расхождении можно своевременно внести соответствующие коррективы в рассчитанный дозиметрический план для последующих сеансов облучения.

Здесь невозможно изложить полностью все методические рекомендации по гарантии качества лучевой терапии для множества разнообразных радиационно-терапевтических аппаратов и технологий терапевтического облучения. Существует большое количество официальных публикаций ВОЗ, МАГАТЭ, МКРЗ, ИОМР (Международной организации по медицинской физике), ЕФОМР (Европейской федерации организаций по медицинской физике) и ААРМ (Американской ассоциации медицинских физиков), посвященных вопросам гарантии качества лучевой терапии и обеспечения РБ пациентов при терапевтическом облучении. Переводы на русский язык наиболее важных из них опубликованы в журнале “Медицинская физика”, полный комплект которого имеется в Ассоциации медицинских физиков России. Официальные отечественные нормативные документы по гарантии качества лучевой терапии все еще отсутствуют. Литературные обзоры по позиционированию и иммобилизации пациента, центровке пучка и симуляции дистанционного терапевтического облучения опубликованы в первых номерах журнала “Медицинская радиология и радиационная безопасность” за 2009 г.

Ядерная медицина

Применительно к ядерной медицине принцип обоснованности (оправданности) использования открытых радионуклидных источников означает:

- принятие компетентными органами Минздравсоцразвития РФ обоснованного решения о клиническом применении конкретных диагностических и терапевтических радиофармпрепаратов (РФП);
- принятие органами Роспотребнадзора РФ обоснованных решений об утверждении проектов строительства новых и реконструкции действующих радиологических корпусов с подразделениями ядерной медицины;
- принятие различными государственными органами обоснованных решений о выдаче лицен-

зий (Ростехнадзор) и санитарно-эпидемиологических заключений (Роспотребнадзор), дающих право работать с открытыми радионуклидными источниками в подразделениях ядерной медицины;

- принятие врачами-радиологами клинически обоснованных решений о проведении радиодиагностических исследований или радиотерапевтических процедур, при реализации которых реальная чистая польза для конкретного больного (диагностическая информация или терапевтический эффект) должна заведомо превышать риск любых возможных стохастических и нестохастических радиационно-индуцированных эффектов;
- принятие руководством подразделений ядерной медицины обоснованных решений об использовании тех или иных средств и технологических приемов при ликвидации последствий радиационных аварий в помещениях подразделения ядерной медицины.

Принцип оптимизации при проведении ядерно-медицинских процедур предусматривает:

- поддержание индивидуальных доз облучения пациентов на самом низком из практически возможных уровней при условии получения необходимой диагностической информации при радионуклидной диагностике (РНД) или полезного терапевтического эффекта для больного при радионуклидной терапии (РНТ);
- проектирование, эксплуатацию и поддержание средств и технологий ядерной медицины на уровне, обеспечивающем настолько низкие дозы облучения пациентов, насколько это разумно достижимо с учетом экономических и социальных факторов.

Принцип нормирования применительно к ядерной медицине, как уже отмечалось, непосредственно не используется, но в каждом подразделении радионуклидной диагностики могут быть установлены контрольные уровни (но не пределы доз!) допустимого облучения пациентов от вводимых в организм РФП.

Решение о необходимости проведения РНД *in vivo* и (или) РНТ принимает лечащий врач. Обоснование при назначении ядерно-медицинской процедуры вписывается в амбулаторную карту или в историю болезни. При невозможности передачи амбулаторной карты или истории болезни с пациентом обоснование записывается в выданном направлении на ядерно-медицинскую процедуру.

Важно подчеркнуть, что единоличную ответственность за проведение ядерно-медицинской процедуры несет проводящий ее врач-радиолог. Он принимает окончательное решение о типе и методике

процедуры, руководствуясь основными принципами обоснованности и оптимизации. При этом он имеет право отказаться от проведения ядерно-медицинской процедуры, если нет клинических показаний и (или) обоснования направления. О принятом решении он обязан проинформировать лечащего врача и зафиксировать мотивированный отказ в амбулаторной карте, истории болезни или направлении на процедуру. При инструктаже старшего медицинского персонала необходимо постоянно напоминать, что данное врачу-радиологу право принятия решения о необходимости ядерно-медицинской процедуры является одной из основных мер обеспечения РБ пациентов в ядерной медицине.

Если в данном учреждении установлены контрольные уровни допустимого облучения пациентов при РНД и при рентгенодиагностике, то при назначении повторного радиодиагностического исследования, помимо клинических показаний, необходимо учитывать суммарную дозу облучения, полученную пациентом в результате всех рентгено-радиологических исследований, которые были проведены в течение года перед повторным исследованием, в том числе и в других медицинских учреждениях. Однако в случае необходимости оказания больному помощи по жизненным показаниям или неотложной помощи ядерно-медицинская процедура проводится без учета сроков и результатов предшествующих рентгено-радиологических исследований. РНТ неонкологических заболеваний должна назначаться только после тщательной оценки вероятности отдаленных последствий облучения и риска, связанного с альтернативными методами лечения.

Врач-радиолог для каждого конкретного больного должен выбрать наиболее подходящий РФП, методику ядерно-медицинской процедуры, а также наименьшую возможную активность вводимого в организм больного РФП, исходя из того, чтобы необходимая диагностическая информация или достаточный терапевтический эффект были получены при наименьшей эффективной дозе облучения пациента. В планировании процедур РНТ обязательно должен принимать непосредственное участие медицинский физик.

До введения РФП больному врач-радиолог должен проконтролировать правильность выполнения всех предписанных ранее и необходимых для подготовки к данной ядерно-медицинской процедуре мероприятий, а также проинструктировать больного относительно его поведения до, в ходе и после процедуры, имея в виду снижение лучевой нагрузки на самого больного, на персонал и на отдельных лиц из населения. Инструктаж должен проводиться

с учетом клинического и психологического состояния больного, уровня его знаний в области РБ и других конкретных обстоятельств. Особенно тщательным должен быть инструктаж больного при госпитализации в “активную” палату с закрытым режимом. По требованию пациента врач-радиолог должен информировать его об ожидаемой дозе облучения.

При выявлении ошибочного или экстравазального введения *диагностического* РФП врач-радиолог должен принять обоснованное решение о повторном введении РФП. При выявлении ошибочного или экстравазального введения *терапевтического* РФП данное введение должно быть квалифицировано как радиационная авария, и для ликвидации ее последствий необходимо действовать в соответствии с рекомендациями в части 4 настоящей работы.

При ожидании своей очереди на радиодиагностические исследования пациенты с уже введенными РФП должны размещаться в специализированных и (или) общих (холлы, коридоры) помещениях подразделения ядерной медицины на максимально возможном удалении друг от друга. Врач-радиолог должен проинструктировать больного относительно соблюдения неподвижности тела при проведении радиодиагностических измерений, а лаборантка или медсестра, проводящая измерения, должна непрерывно контролировать неподвижность в ходе этих измерений. В зависимости от клинического состояния больного и при исследованиях детей следует прибегать к психологической, фармакологической или механической иммобилизации пациента. О нарушении неподвижности тела пациента медсестра должна сообщать врачу-радиологу. Для снижения дозы внутреннего облучения после окончания радиодиагностических измерений врач-радиолог может рекомендовать больному изменение пищевого режима, очистительные процедуры и (или) прием мочегонных или слабительных средств в зависимости от типа и активности введенного РФП и от клинического состояния больного.

При оформлении эпикриза лечащий врач должен указать суммарную эффективную дозу наружного и внутреннего облучения, полученную пациентом во время рентгенорадиологических процедур в данном медицинском учреждении.

РНД *in vivo* не проводится: женщинам репродуктивного возраста в период установленной или возможной беременности, за исключением случаев, когда РНД необходима по жизненным показаниям. При введении диагностического или терапевтического РФП кормящей женщине грудное вскармливание младенца должно быть временно приостановлено, причем продолжительность его прерывания уста-

навливается врачом-радиологом и медицинским физиком в зависимости от типа и активности введенного РФП, в том числе и на основе соответствующих рекомендаций МКРЗ и МАГАТЭ. Пациент имеет право отказаться от ядерно-медицинских процедур, за исключением радиодиагностических исследований, проводимых для выявления эпидемиологически опасных заболеваний.

В настоящее время лучевая нагрузка на пациента, которому с диагностической или терапевтической целью вводится РФП, может быть легко рассчитана по табулированным данным. В свою очередь, эти данные являются результатом эффективного применения так называемого MIRD-формализма – математического аппарата дозиметрии внутреннего облучения от инкорпорированных радиоактивных соединений, в том числе и от РФП. MIRD-формализм основан на вычислении доз в органах-мишенях при их облучении от органов-источников, для чего предварительно методом Монте-Карло рассчитываются средние поглощенные дозы в органах-мишенях на единицу накопленной активности в органах-источниках с учетом динамики накопления и выведения РФП из последних.

Первые расчеты по такой методике были проведены MIRD-комитетом Общества ядерной медицины США (Medical Internal Radiation Dose Committee) для математического фантома так называемого “условного человека” МКРЗ. Впоследствии MIRD-формализм был оформлен в виде пакета компьютерных программ. Вторая его версия MIRD-DOSE2 позволяет рассчитывать эффективные и органные дозы облучения на основе данные для шести гетерогенных геометрических фантомов с низкой степенью антропоморфности (взрослый мужчина, новорожденный и дети в возрасте 1, 5, 10 и 15 лет), для 50 различных радионуклидов, 26 органов-источников и 25 органов-мишеней. В следующей версии MIRD-DOSE3, доступной через Интернет, добавлены данные для геометрических фантомов взрослой женщины, небеременной и с беременностью сроком в 3, 6 и 9 месяцев, эмбриона и плода, а также для расчета доз в патологических очагах сферической формы и в костном мозге с учетом формы энергетического спектра испускаемых бета-частиц. Под названием OLINDA эта версия была адаптирована для персональных компьютеров, работающих в операционных средах Unix, MacIntosh, Windows. Последняя версия под названием RADAR (www.doseinforadar.com) обеспечивает набор данных для 800 радионуклидов, поглощенных фракций для всех известных стилизованных и некоторых воксельных фантомов различной степени антропоморфности, усредненных кинетических данных для 58 различ-

ных РФП, в том числе 17 терапевтических РФП, а также соответствующие оценки радиационных рисков внутреннего облучения.

Полученные в обширных расчетах результаты были обобщены и табулированы в официальных

рекомендациях MIRД-комитета, в Публикациях 53 и 80 МКРЗ и в приложении к Публикации 62 МКРЗ. Поскольку эти документы не переведены на русский язык и малодоступны, в табл. 1 собраны современные данные об удельных эффектив-

Таблица 1

Эффективные дозы внутреннего облучения пациентов различного возраста при внутривенном введении радиофармпрепаратов из расчета на единицу введенной активности, мЗв/МБк

Радиофармпрепарат	15 лет	15 лет	10 лет	5 лет	1 год
³² P – фосфат	2,20	3,00	5,10	10,0	22,0
⁵¹ Cr – EDTA	0,0023	0,0031	0,0046	0,0070	0,0132
⁵¹ Cr – эритроциты (in vitro мечение)	0,26	0,33	0,52	0,80	1,50
⁶⁷ Ga – цитрат	0,12	0,16	0,25	0,40	0,79
⁷⁵ Se – селенметионин	3,0	3,8	6,5	9,2	15,0
^{99m} Tc – пертехнетат без блокировки щитовидной железы с блокировкой щитовидной железы	0,013 0,0053	0,016 0,0056	0,025 0,0098	0,040 0,015	0,073 0,026
^{99m} Tc – альбумин	0,0079	0,0097	0,015	0,023	0,042
^{99m} Tc – ДТРА в норме при сниженной функции почек	0,0063 0,0053	0,0078 0,0066	0,011 0,0097	0,017 0,015	0,030 0,026
^{99m} Tc – коллоид в норме при диффузных поражениях печени	0,014 0,017	0,018 0,019	0,028 0,029	0,041 0,043	0,073 0,076
^{99m} Tc – производные IDA в норме при паренхиматозных поражениях печени	0,024 0,013	0,029 0,016	0,044 0,024	0,070 0,037	0,150 0,075
^{99m} Tc – MIBI	0,0083	0,010	0,017	0,029	0,057
^{99m} Tc – HMPAO	0,0093	0,011	0,019	0,037	0,067
^{99m} Tc – MAG3	0,0079	0,0098	0,014	0,023	0,047
^{99m} Tc – лейкоциты (in vitro мечение)	0,011	0,013	0,023	0,039	0,077
^{99m} Tc – фосфаты, фосфонаты в норме при нарушенной функции почек	0,0080 0,0082	0,010 0,011	0,015 0,017	0,025 0,028	0,051 0,061
^{99m} Tc – макроагрегат альбумина	0,012	0,018	0,025	0,038	0,069
^{99m} Tc – эритроциты (in vivo мечение)	0,0081	0,0099	0,015	0,024	0,043
^{99m} Tc – DMSA	0,016	0,019	0,027	0,042	0,069
^{99m} Tc – микросферы	0,011	0,016	0,022	0,033	0,062
^{99m} Tc – аэрозоль (ингаляция)	0,0011	0,0012	0,0021	0,0035	0,0069
¹¹¹ In – блеомицин	0,16	0,20	0,29	0,44	0,77
¹¹¹ In – октреотид	0,0054	0,0064	0,011	0,019	0,037
^{113m} In – элюат	0,013	0,017	0,028	0,046	0,092
¹²³ I – MIBG	0,014	0,015	0,029	0,049	0,095
¹³¹ I – йодид натрия без блокировки щитовидной железы с блокировкой щитовидной железы	24 0,072	37 0,088	56 0,14	120 0,21	220 0,41
¹³¹ I – альбумин	0,86	1,12	1,7	2,8	5,4
¹³¹ I – макроагрегат альбумина	0,52	0,73	1,1	1,6	3,1
¹³¹ I – гиппурат	0,066	0,083	0,13	0,19	0,37
¹³¹ I – бенгал-роз	0,91	1,14	1,9	3,2	6,3
¹³³ Xe – раствор	0,00019	0,00026	0,00041	0,00064	0,0013
¹⁹⁸ Au – коллоид	1,5	2,1	3,3	5,3	10,1
²⁰¹ Tl – хлорид	0,23	0,36	1,5	2,2	3,4

ных дозах облучения от наиболее применяемых зарубежных РФП. Аналогичные данные об РФП отечественного производства приведены в табл. 2. Умножив соответствующее значение из таблицы на вводимую пациенту активность РФП в единицах МБк, можно получить достаточно точную для клиники оценку эффективной дозы облучения в единицах мЗв.

Значительные трудности возникают при дозиметрическом планировании и контроле доз внутреннего облучения патологических очагов и нормальных тканей при РНТ. Особенно это относится к облучению критических по радиочувствительности органов, прежде всего, основного органа кроветворения – красного костного мозга, неравномерно распределенного по всему скелету. Именно возникающие при этом явления миелотоксичности ограничивают функциональные возможности РНТ и представляют собой наиболее важный фактор в обеспечении РБ пациентов.

В течение пребывания в “активной” палате больной периодически вызывается в кабинеты отделения РНТ, где находятся гамма-камера или клинический радиометр, для измерений функции удержания терапевтической активности РФП в органах-мишенях и (или) патологических очагах. При этом должны быть предприняты определенные меры, предотвращающие занесение поверхностных радиоактивных загрязнений с тела, одежды и обуви пациента на рабочие поверхности, особенно на дверные ручки, и на детекторы радиометра и гамма-камеры. Перед выходом из палаты больной должен вымыть с мылом руки, лицо и шею, сменить обувь (надеть бахилы), а прежде чем войти в кабинет радиометрии должен подвергнуться процедуре определения уровней загрязненности тела, одежды и обуви по бета-излучению в пункте радиационного контроля пациентов.

При выписке из отделения РНТ больной сдает загрязненную радиоактивностью больничную одеж-

ду и сменную обувь, проходит санобработку с принятием душа в санпропускнике, после чего в пункте радиационного контроля проходит процедуру определения уровней радиоактивности в теле и на своей собственной одежде и обуви по мощности эквивалентной дозы гамма-излучения и по мощности флюенса бета-излучения.

Измерения мощности дозы гамма-излучения от тела амбулаторных больных с введенной терапевтическими активностями РФП должны также проводиться в пункте радиационного контроля. Это относится и к пациентам, которые находились в помещении дневного пребывания для выдержки на распад РФП типа ^{153}Sm . При этом, в соответствии с НРБ-99, мощность дозы на расстоянии 1 м от тела пациента на выходе из отделения радионуклидной терапии не должна превышать 3 мкЗв/час. В настоящее время проводится пересмотр раздела “Медицинское облучение” в НРБ-99, после которого этот чрезмерно жесткий норматив будет существенно смягчен в соответствии с рекомендациями МКРЗ и МАГАТЭ.

Рентгенодиагностика и интервенционная радиология

Применительно к рентгенодиагностике и интервенционным процедурам, выполняемым под рентгенологическим контролем, принцип обоснованности означает:

- приоритетное использование альтернативных (нерadiационных) методов медицинской визуализации;
- проведение рентгенодиагностических исследований строго по клиническим показаниям;
- выбор наиболее щадящих методик и технологий рентгенодиагностических исследований;
- риск отказа от рентгенодиагностического исследования должен заведомо превышать риск от облучения пациента при его проведении.

Таблица 2

Эффективные дозы внутреннего облучения E взрослых пациентов при внутривенном введении отечественных радиофармпрепаратов из расчета на единицу введенной активности, мЗв/МБк

РФП	E	РФП	E	РФП	E	РФП	E
^{99m}Tc -макротех	0,0198	^{99m}Tc -технетрил	0,0197	^{111}In -цитрин	0,160	^{99m}Tc -альбумин	0,0079
^{99m}Tc -пентатех	0,0099	^{99m}Tc -пирфотех	0,074	^{113m}In -индифит	0,0496	^{67}Ga -цитрат галлия	0,115
^{99m}Tc -технефит	0,0317	^{99m}Tc -пертехнетат	0,0110	^{113m}In -индифор	0,0151	^{131}I -бенгал-роз	0,904
^{99m}Tc -технемек	0,0152	^{99m}Tc -бромезида	0,0306	^{123}I -МИБГ	0,0894	^{131}I -йодид	1,152
^{99m}Tc -технефор	0,0061	^{99m}Tc -технемаг	0,0122	^{123}I -йодид	0,567	^{131}I -гиппурат	0,125
^{99m}Tc -карбомек	0,0082	^{99m}Tc -теоксим	0,0142	^{123}I -гиппурат	0,0246	^{201}Tl -хлорид	0,0643

Принцип оптимизации при рентгенологических исследованиях осуществляется посредством:

- поддержания доз облучения пациентов на таких низких уровнях, какие возможно достичь, обеспечив получение достоверной диагностической информации в виде выявления патологического процесса, оценки степени его тяжести и распространенности в организме больного;
- проектирования, эксплуатации и поддержания средств и технологий рентгенодиагностических исследований на уровне, обеспечивающем настолько низкие дозы облучения пациентов, насколько это возможно с учетом экономических и социальных факторов.

Как и в РНД, принцип нормирования применительно к рентгенодиагностике непосредственно не используется, но в каждом рентгенодиагностическом подразделении могут быть установлены контрольные уровни (но не пределы доз!) допустимого облучения пациентов.

Направление пациента на рентгенологические процедуры осуществляет лечащий врач по обоснованным клиническим показаниям. Окончательное решение о целесообразности, объеме и технологии процедуры принимает врач-рентгенолог, и именно он несет основную ответственность за свое решение как одну из основных мер обеспечения РБ пациента при данном виде медицинского облучения. При необоснованных направлениях на рентгенологические исследования (отсутствие предварительного диагноза, возможность проведения нерадиационного исследования аналогичного назначения и т.д.) врач-рентгенолог должен отказать пациенту в проведении рентгенологического исследования, предварительно проинформировав об этом лечащего врача и зафиксировав свой отказ в истории болезни (амбулаторной карте).

По требованию пациента ему должна быть предоставлена полная информация об ожидаемой или уже полученной им дозе облучения и ее возможных последствиях. Последнее особенно важно при проведении различных интервенционных процедур под рентгенологическим контролем, когда вполне возможно возникновение ясно выраженных радиационных поражений кожи облучаемого участка тела. Пациент имеет право отказаться от медицинских рентгенологических процедур, за исключением профилактических исследований с целью выявления опасных в эпидемиологическом отношении заболеваний, например, туберкулеза.

При всех видах рентгенологических исследований и интервенционно-радиологических процедур размеры поля облучения должны быть минимальными, продолжительность проведения процедуры –

возможно более короткой, но не в ущерб качеству исследования. Важно обеспечить оптимальное позиционирование пациента на рентгенодиагностическом аппарате, использовать аппараты с максимально возможной чувствительностью системы детектирования рентгеновских изображений, а также заменять режим рентгеноскопии режимом рентгенографии, насколько это возможно без потери диагностической информации. Геометрия облучения и режимы работы рентгенодиагностической аппаратуры должны быть оптимальными для каждой технологии рентгенодиагностических исследований. При этом в каждом конкретном случае требуется выбирать индивидуальное кожно-фокусное расстояние, материал и толщину дополнительного фильтра на рентгеновской трубке, напряжение на ней и величину экспозиции в зависимости от чувствительности системы детектирования рентгеновского излучения и толщины исследуемого участка тела пациента. Необходимо экранировать область таза, гонад, щитовидной железы, глаз, особенно у лиц репродуктивного возраста. У детей ранних возрастов должно быть обеспечено экранирование всего тела за пределами исследуемого участка тела.

Врач-рентгенолог, в соответствии с методическими указаниями МУК 2.6.1.1797–03, регистрирует значение индивидуальной эффективной дозы облучения в специальном листке учета лучевых нагрузок при проведении рентгенорадиологических процедур, копии которого вклеиваются в историю болезни, амбулаторную карту и в эпикриз, передаваемый пациентов в поликлинику по месту жительства. В целях предотвращения необоснованного повторного облучения пациента на всех этапах его медицинского обслуживания, в том числе и в других лечебно-профилактических учреждениях, необходимо учитывать результаты ранее проведенных рентгенологических исследований и дозы, полученные при этом в течение года. Повторные исследования проводятся только при изменении течения болезни или появлении нового заболевания, а также при необходимости получения расширенной информации о состоянии здоровья пациента и уточнения диагноза.

В настоящее время лучевая нагрузка на пациента в подразделениях рентгенодиагностики и интервенционной радиологии медицинских учреждений России определяется с помощью специализированного отечественного дозиметра рентгеновского излучения ДРК-1 или ДРК-1М (изготовитель ООО НПП “Доза”, www.doza.ru). Его проходная ионизационная камера устанавливается непосредственно на диафрагме рентгеновского излучателя, а показания дозиметра регистрируются в виде произведения дозы

на площадь облучаемого участка тела в единицах $\text{сГр}\times\text{см}^2$. Если рентгенодиагностический аппарат не оборудован измерителем произведения дозы на площадь, определение эффективной дозы облучения пациента проводят с использованием значений радиационного выхода рентгеновского излучателя, регулярно измеряемого в рамках программ гарантии качества рентгенодиагностики.

Исходная информация для расчета индивидуальной эффективной дозы облучения пациента должна включать:

- 1) характеристики, определяющие радиационно-физические параметры поля рентгеновского излучения во время проведения рентгенологической процедуры:
 - значение анодного напряжения на рентгеновской трубке, кВп;
 - толщину и материал дополнительного фильтра (обычно используется дополнительный фильтр толщиной 2 мм Al);
 - значение произведения дозы на площадь, $\text{сГр}\times\text{см}^2$;
 - значение экспозиции (количества электричества), $\text{мА}\times\text{с}$;
- 2) характеристики, определяющие геометрические параметры поля рентгеновского излучения:
 - анатомическую область исследования (лёгкие, таз, череп и т.п.);
 - вид проекции (передне-задняя, задне-передняя, боковая);
 - размеры поля облучения (высоту и ширину поперечного сечения пучка излучения на поверхности детектора), см^2 ;
 - фокусное расстояние (расстояние от фокуса рентгеновской трубки до детектора излучения), см;
- 3) сведения о пациенте: возраст пациента (0–0,5 года; 0,5–3 года; 3–8 лет; 8–13 лет; 13–19 лет; старше 19 лет).

Все эти параметры являются исходной информацией для расчета индивидуальных эффективных доз облучения с использованием компьютерной программы EDEREX (НИИ радиационной гигиены, С.-Петербург). Эта программа позволяет в режиме реального времени рассчитать средние значения доз в 22 органах и тканях тела человека и соответствующую эффективную дозу облучения. Однако эта программа не всегда доступна как для медицинских учреждений, особенно поликлинического уровня, так и для органов Роспотребнадзора вследствие плохой технической оснащенности и отсутствия квалифицированных медицинских физиков. Поэтому значение эффективной дозы E облучения пациента данного возраста можно определить по приближенной формуле:

$$E = \Phi \cdot K_d,$$

где Φ – измеренная величина произведения дозы на площадь, $\text{сГр}\times\text{см}^2$; K_d – коэффициент перехода к эффективной дозе облучения пациента данного возраста с учетом вида проведенного рентгенологического исследования, проекции, размеров поля облучения, фокусного расстояния, экспозиции и анодного напряжения на рентгеновской трубке, $\text{мкЗв}/(\text{сГр}\times\text{см}^2)$.

Исчерпывающие таблицы коэффициентов K_d приведены в методических указаниях МУК 2.6.1.1797–03 “Контроль эффективных доз облучения пациентов при медицинских рентгенологических исследованиях”. Взятые из них типовые значения эффективных доз и коэффициентов пересчета для взрослых пациентов приведены в табл. 3 и 4.

Как уже отмечалось выше для РНД, пределы доз облучения пациентов при рентгенодиагностике также не устанавливаются. Однако в соответствии с НРБ-99 при проведении профилактических рентгенологических исследований и научных исследований практически здоровых лиц установлен норматив, составляющий 1 мЗв/год. Кроме того, при достижении накопленной дозы диагностического облучения 500 мЗв за все годы жизни пациента должны быть приняты меры по дальнейшему ограничению его облучения, если только лучевые процедуры не обусловлены жизненными показаниями.

При рентгеновской компьютерной томографии (КТ) лучевые нагрузки на пациента существенно выше, чем при обычной рентгенографии. Они варьируют в широких пределах: входная кожная доза изменяется от 3 до 15 мГр, тогда как эффективная доза – от 0,2 до 6,0 мЗв в зависимости от возраста и размеров тела пациента, геометрии облучения, режимов работы аппаратуры и т.д.

Аналогичная ситуация имеет место и при разнообразных интервенционных процедурах, проводимых под рентгенологическим контролем. Здесь входная кожная доза в зависимости от типа процедуры, продолжительности рентгеноскопии, квалификации и опыта оперирующего рентгенохирурга и других факторов варьирует в среднем от 0,5 до 10 Гр и даже выше, а эффективная доза – от 1 до 40 мЗв. Такие значения эффективной дозы, как и для КТ, клинически вполне приемлемы, т.к. они заведомо обеспечивают отсутствие любых радиационно-индуцированных поражений тех органов и систем, которые находятся вне поля прямого облучения. Чего, однако, нельзя сказать о локальных поверхностных входных дозах облучения непосредственно в пучке рентгеновских фотонов таких

Таблица 3

**Значения коэффициентов перехода к эффективной дозе
для рентгенодиагностических процедур различных органов и систем**

Область исследования	Тип процедуры	Проекция	Размер поля, (a×b), см ²	Фокусное расстояние, см	Напряжение на трубке, кВп	K _d , мкЗв/сГр×см ²
Легкие	Rg	ЗП	30 × 40	100	80 – 90	2,0
Легкие	Rg	ЗП	30 × 40	150	80 – 90	1,9
Легкие	Rg	Б	30 × 40	150	90 – 100	1,5
Легкие	Rs	ЗП	30 × 30	60	80	2,1
Легкие + УРИ	Rs	ЗП	30 × 30	60	60	1,4
Флюорография легких	Rg	ЗП	35 × 35	100	80	1,8
Череп	Rg	ПЗ	24 × 30	100	60 – 70	0,71
Череп	Rg	Б	24 × 30	100	60 – 70	0,30
Шейный отдел позвоночника	Rg	ЗП	18 × 24	80	70 – 80	0,54
Шейный отдел позвоночника	Rg	Б	18 × 24	80	70 – 80	1,3
Грудной отдел позвоночника	Rg	ПЗ	24 × 30	100	80	2,2
Грудной отдел позвоночника	Rg	ПЗ	15 × 40	100	80	1,4
Грудной отдел позвоночника	Rg	Б	24 × 30	100	80	1,3
Грудной отдел позвоночника	Rg	Б	15 × 40	100	80	1,4
Поясничный отдел позвоночника	Rg	ПЗ	24 × 30	100	80	2,5
Поясничный отдел позвоночника	Rg	ПЗ	15 × 40	100	80	2,1
Поясничный отдел позвоночника	Rg	Б	24 × 30	100	90	1,0
Поясничный отдел позвоночника	Rg	Б	15 × 40	100	90	1,1
Плечо, ключица	Rg	ПЗ	24 × 18	100	70 – 80	0,9
Ребра, грудина	Rg	ПЗ	30 × 40	100	80	2,5
Ребра, грудина	Rg	ПЗ	24 × 30	100	80	2,4
Таз, крестец	Rg	ПЗ	40 × 30	100	80 – 90	2,0
Таз, крестец	Rg	Б	30 × 24	100	90 – 100	1,3
Тазобедренные суставы	Rg	ПЗ	24 × 30	100	70 – 90	3,1
Бедро	Rg	ПЗ	15 × 40	100	70 – 80	0,54
Пищевод	Rs	ЗП	20 × 35	60	90 – 100	2,1
Пищевод + УРИ	Rs	ЗП	20 × 35	60	60 – 70	1,4
Желудок	Rs	ЗП	24 × 30	60	90 – 100	1,9
Желудок + УРИ	Rs	ЗП	24 × 30	60	80	1,6
Желудок	Rg	ЗП	18 × 24	100	70 – 80	1,6
Желудок	Rg	Б	18 × 24	100	70 – 80	1,4
Кишечник	Rs	ЗП	30 × 30	60	90 – 100	2,2
Кишечник	Rg	ЗП	30 × 40	100	90 – 100	2,0
Кишечник	Rg	Б	30 × 40	100	100	1,3
Холецистография	Rg	ЗП	18 × 24	100	90	1,3
Холецистография	Rg	ЗП	24 × 30	100	90 – 100	1,6
Урография	Rg	ЗП	40 × 30	100	80 – 90	1,4
Цистография	Rg	ЗП	30 × 40	100	70 – 80	1,5

Таблица 4

Средние значения эффективных доз для наиболее распространенных рентгенодиагностических исследований с типичными значениями напряжения на рентгеновской трубке и экспозиции, установленными на основе экспертных оценок

Область исследования	Метод исследования	Проекция	Напряжение, кВп	Экспозиция, мАс	Эффективная доза, мкЗв
Легкие	Rg	ЗП	80	25	150
Легкие	Rg		90	60	370
Легкие	Rs	ЗП	77	60	1800
Легкие	Rs + УРИ	ЗП	63	32	400
Легкие	Rs	ЗП	80	60	800
Череп	Rg	ПЗ	70	100	230
Череп	Rg	Б	70	100	100
Шейный отдел позвоночника	Rg	ЗП	70	80	140
Шейный отдел позвоночника	Rg	Б	70	80	310
Грудной отдел позвоночника	Rg	ПЗ	75	80	690
Грудной отдел позвоночника	Rg	Б	80	80	470
Поясничный отдел позвоночника	Rg	ПЗ	80	170	1900
Поясничный отдел позвоночника	Rg	Б	90	250	1400
Плечо, ключица	Rg	ПЗ	70	60	100
Ребра, грудина	Rg	ПЗ	75	80	780
Таз, крестец	Rg	ПЗ	80	150	2200
Таз, крестец	Rg	Б	90	220	1600
Тазобедренные суставы	Rg	ПЗ	75	120	1500
Бедро	Rg	ПЗ	70	75	110
Пищевод	Rs	ЗП	90	60	2000

Примечания к табл. 3 и 4:

Rg – рентгенография, Rs – рентгеноскопия, УРИ – усилитель рентгеновского изображения;

ПЗ – передне-задняя проекция, ЗП – задне-передняя проекция, Б – боковая проекция (в этом случае приведено усредненное значение эффективной дозы из двух ее значений, рассчитанных для облучения справа и слева);

a – ширина поля, b – высота поля;

Значения дозовых коэффициентов приведены для дополнительного фильтра 2 мм Al.

радиочувствительных органов, как кожа и хрусталик глаза. В частности, известно, что доза 2 Гр вызывает эритему кожи и катаракту хрусталика, 7 Гр – перманентную эпиляцию, 10 Гр – сухую десквамацию кожи, 12 Гр – практически незаживающие лучевые язвы кожи. Поэтому при подобных интер-

венционных процедурах необходимо применять специфические меры радиационной защиты кожи и хрусталика, известные в лучевой терапии.

Поступила 12.04.09