Медицинское диагностическое облучение: проблема радиационной безопасности. Обзор

Кашеев В.В., Пряхин Е.А.

МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

Динамичное развитие ядерных радиационных технологий и их применение в гражданских целях подтверждают необходимость убедительных научно-обоснованных оценок безопасности не только для работников атомной промышленности, но и в случаях медицинского облучения пациентов. В Международных основных нормах безопасности, опубликованных МАГАТЭ в 2011 г., рассматриваются три типа ситуаций облучения: планируемое, аварийное и существующее. Различаются также три категории облучения: профессиональное облучение, облучение населения и медицинское облучение пациентов. Медицинское облучение относится к ситуациям планируемого облучения. В данной статье представлен обзор ключевых российских и зарубежных исследований возможного неблагоприятного воздействия медицинского облучения на здоровье человека, а также различных существующих методов оценки возможного вреда здоровью человека в результате медицинских радиологических диагностических процедур. Наиболее распространёнными медицинскими диагностическими методами являются: флюорография, рентгенография, компьютерная томография (КТ), а также процедуры, связанные с применением радионуклидов, в том числе ПЭТ или ПЭТ-КТ. Наибольший вклад в коллективную дозу медицинского облучения вносит компьютерная томография и радионуклидная диагностика. Они составляют 3,3% от общего числа сделанных процедур, при этом их вклад составляет 47,8% в ежегодную дозу медицинского облучения в России. До настоящего времени не существует единого подхода к оценке радиационных рисков медицинского облучения. Применяются различные методы, имеющие свои недостатки и допущения, которые либо не подходят для оценки рисков на индивидуальном уровне, либо их сложно применить на практике. При этом международные нормы безопасности требуют, чтобы пациент был проинформирован о возможных неблагоприятных последствиях радиологической процедуры, а также о рисках, связанных с воздействием излучения. Разработка и внедрение в практическое использование единого метода являются ключевым вопросом радиационной безопасности при медицинском облучении, который необходимо решить в ближайшие годы.

Ключевые слова: медицинское облучение, ядерная медицина, радионуклидная диагностика, компьютерная томография (КТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), пожизненный атрибутивный риск (LAR), избыточный относительный риск (ERR), многократное и однократное облучение, онкологическая заболеваемость, радиационный риск, эффективная доза.

Введение

Медицинское облучение является одним из главных техногенных источников облучения. В отличие от других видов медицинское облучение имеет ряд особенностей, как пишет Т.В. Пономарёва с соавт. [1], оно является осознанным, управляемым и контролируемым действием двух сторон: врача и пациента. Важно отметить, что для ослабленного организма диагностическое облучение может оказаться более патогенным, чем для здорового [2]. Основную часть медицинского облучения составляют диагностические процедуры с применением рентгеновских, ультразвуковых, радионуклидных, ангиографических, рентгенохирургических и термографических методов диагностики, а также рентгеновской и магнитно-резонансной компьютерной томографии [3]. Согласно данным отчёта Научного комитета ООН по действию атомной радиации общемировая средняя годовая доза облучения на душу населения составляет 3 мЗв, при этом 0,6 мЗв приходится на медицинское облучение, что уступает только облучению насе-

Кашеев В.В. – зав. лаб., к.б.н.; Пряхин Е.А.* – научн. сотр. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-32-81; e-mail: nrer@obninsk.com.

ления радоном – 1,26 мЗв. При этом в развитых странах вклад медицинского облучения в среднюю годовую дозу может быть ещё большим. Например, в США ежегодная эффективная доза составляет 6 мЗв, доза медицинского диагностического облучения – 3 мЗв. В России иная ситуация: средняя ежегодная эффективная доза облучения на душу населения составляет 3,7 мЗв, а на долю медицинского облучения приходится только 13,6% от этой величины (рис. 1). При этом наиболее распространёнными медицинскими диагностическими процедурами являются флюорография и рентгенография, их доля в общем количестве проводимых радиологических процедур составляет более 90%, но вклад в дозу медицинского облучения очень мал. Компьютерная томография от общего числа радиологических процедур составляет всего 3,3%, но суммарный вклад КТ в ежегодную коллективную дозу медицинского облучения составляет 47,8% от всего медицинского облучения в России [4]. Нужно учитывать рост применения компьютерной томографии как эффективного диагностического метода. В России с 2004 по 2016 гг. число ежегодных обследований с применением КТ на душу населения выросло почти в 4 раза [4]. Применение КТ может вызвать неблагоприятные для здоровья последствия. В российских основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) утверждается, что проведение медицинских радиологических процедур должно быть обосновано путём сопоставления пользы диагностического обследования с возможным радиационным ущербом для здоровья. Поэтому пациент должен быть информирован о возможных неблагоприятных последствиях, связанных с диагностическим обследованием [5, 6].

Уровни медицинского облучения в России

В России, как и в других странах, уровни доз при медицинском облучении зависят от уровня развития медицинских диагностических технологий и оборудования. За последнее десятилетие произошла глубокая модернизация медицинских диагностических установок, внедряются всё новые и новые компьютерные томографы, установки ПЭТ и ПЭТ-КТ [7]. В США в 2007 г. было проведено более 70 млн КТ-процедур, что в 10 раз меньше, чем в России за 2013 г. [8]. Коллективная доза от медицинского облучения в России, как и во всём мире, вносит большой вклад в коллективную дозу облучения населения от других источников (рис. 1). Причём облучению подвергаются не только пациенты, но и врачи, обслуживающий персонал, а также здоровые лица при профилактических обследованиях. Кроме того, медицинское облучение имеет ряд особенностей, которые могут усугубить действие ионизирующего излучения на организм, например, большая мощность дозы и неравномерность облучения органов и тканей. Также необходимо учитывать, что очень часто воздействию радиации может подвергаться уже ослабленный болезнью человек или лица, имеющие высокую чувствительность к воздействию ионизирующего излучения (дети и беременные женщины).

Рис. 1. Структура облучения населения в России.

Наибольшие дозовые нагрузки на организм человека (за одну процедуру) дают высокоинформативные диагностические исследования, такие как: компьютерная томография (КТ), интервенционные исследования, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), а также позитронно-эмиссионная компьютерная томография (ПЭТ-КТ). Как уже отмечалось, в России наибольший вклад в коллективную дозу медицинского облучения вносит компьютерная томография. Доля КТ-исследований в рентгенодиагностике постоянно возрастает. При этом наиболее распространёнными остаются относительно малоинформативные флюорография и рентгенография (табл. 1). Они составляют 96% от всех медицинских радиологических процедур [9]. В развитых странах количество высокоинформативных диагностических процедур в разы выше, чем в России, хотя в последние годы в нашей стране идёт тенденция к их увеличению. Открываются центры радионуклидной диагностики, появляется всё больше частных клиник, где используются различные современные компьютерные томографы.

Таблица 1

Структура медицинских радиологических процедур в России

Процедура	Вклад, %
Радиография	64,1
Флюорография	31,1
КТ	3,3
Флюороскопия	0,9
Интервенционная флюороскопия	0,3
Ядерная медицина	0,3

Радионуклидная диагностика менее развита в России, согласно данным статистике [8] в 2013 г. частота радионуклидных обследований (число исследований на 1000 человек населения) составила 3,7%. Наиболее распространённым диагностическим радионуклидом в России является ^{18}F -ФДГ (фтордезоксиглюкоза), он используется примерно в 95% всех ПЭТ-исследований. На практике также применяется гибридная радиологическая диагностика, т.е. совмещение ПЭТ и КТ. Радиационное облучение на таких установках сравнимо с облучением при высококонтрастной компьютерной томографии, особенно при ПЭТ-КТ всего тела. Коллективная доза от внутреннего облучения радионуклидами при диагностических процедурах в России составляет менее 1% от коллективной дозы медицинского облучения. Однако благодаря развитию ядерной медицины количество обследований и, соответственно, коллективная доза от радионуклидных исследований может увеличиваться.

В 2015 г. в России было проведено 203 млн медицинских диагностических процедур, т.е. 1,4 процедуры на душу населения. За последние 10 лет количество радиологических обследований увеличилось на 35%. Дозы от рентгеновских исследований в значительной степени зависят от радиологического исследования: дозы от диагностических обследований в стоматологии варьируют от 0,01 до 0,1 мЗв, при радиографии дозы составляют 0,1-1 мЗв, при флюороскопии и КТ – 1-10 мЗв, в интервенционных исследованиях – более 10 мЗв. При этом в России средние дозы при рентгеновских исследованиях сравнимы с дозами облучения в зарубежных странах [10]. Средние дозы от обследований всего тела на установках ПЭТ-КТ составляют 15-25 мЗв. В России дозы от радионуклидной диагностики ниже, чем в других странах. По данным единой системы контроля и учёта индивидуальных доз [11-13] общая доза при медицинском облучении в России снизилась с 140000 человеко-зиверт в 2000 г. до 77 000 человеко-зиверт в 2015 г.

Важно также отметить, что варьирование в величине средней дозы между различными медицинскими учреждениями составляет два порядка для радиографии и один порядок для компьютерной томографии.

Очень важным вопросом является безопасность медицинского облучения в детском возрасте. Индивидуальная доза облучения ребёнка может составлять порядка 70 мкЗв на ребёнка в год. Высокие дозовые нагрузки получают дети при исследовании позвоночного столба, лёгких, таза и тазобедренных суставов [14]. Наиболее часто проводятся диагностические исследования опорно-двигательного аппарата и бронхо-лёгочной системы в связи с распространённостью данной патологии у детей [15]. Более высокая чувствительность детского организма к действию ионизирующего излучения, возможно, связана с тем, что облучению подвергаются не только исследуемый орган, но и другие анатомически близко расположенные ткани. При обследовании новорождённых, а также детей младшего возраста необходимо учитывать вероятность облучения практически всего тела в связи с очень близким расположением органов по отношению друг к другу. Кроме того, с увеличением возраста риск развития как соматических, так и генетических эффектов облучения постепенно снижается [15-18].

Методы оценки вреда здоровью человека на основе эффективной и эквивалентной доз

Важным вопросом, связанным с медицинским облучением, является оценка вреда здоровью человека по величине эффективной и эквивалентной доз. Большинство диагностических устройств, связанных с облучением пациента, предоставляет информацию о полученной эффективной дозе для различных типов исследований (исследование грудной клетки, головы и т.д.). Эффективная доза остаётся одним из главных параметров для сравнения различных медицинских радиологических исследований. Кроме того, использование эффективной дозы облучения позволяет сравнивать различные типы радиационного облучения [19]. Термин «эффективная доза» используется при оценке риска облучения всего тела человека [20]. При рентгенологическом обследовании области головы другие части тела практически не подвергаются прямому воздействию рентгеновских лучей. Однако для оценки риска развития неблагоприятных последствий для здоровья пациента рассчитывается не доза прямого облучения обследуемой зоны, а доза общего облучения организма, т.е. эффективная доза облучения. При расчёте эффективной дозы учитывается также относительная чувствительность тканей, попадающих в зону облучения. Эффективная доза позволяет сравнивать величины риска рентгенологического облучения и риска других источников облучения, например, радиационного фона и космических лучей. Использование эффективной дозы в данном случае позволяет свести сравнение различных типов облучения к одному унифицированному параметру. Этот параметр отражает риск неравномерного распределения дозы по всему телу в терминах равномерного облучения всего тела. Таким образом, несмотря на большой разброс доз облучения, различные радиологические методы исследования можно сравнить по величине эффективной дозы. Однако, согласно Рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [21], эффективная доза не предназначена для оценки вреда здоровью конкретного пациента. В Публикации 105 МКРЗ, посвящённой радиационной защите в медицине, дано более жёсткое ограничение использования эффективной дозы для анализа риска (п. 31): «... её (эффективную дозу) не следует использовать для оценки риска стохастических эффектов...» [22]. Однако в ряде работ оценка вреда здоровью человека при медицинском облучении проводится на основе эф-

эффективной дозы [23, 24]. В работах [25-27] сравнили радиационные риски для различных диагностических КТ-процедур и с использованием различных КТ-сканеров, оценённые на основе эффективной и органной доз. Результаты показали, что использование эффективной дозы для оценки величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) может занижать величину радиационного риска в 3 раза (при КТ грудного отдела женщин в возрастной группе 80-85 лет) или, наоборот, завышать риск на 30% (КТ брюшной полости женщин в возрасте 20-24 года). Похожие результаты были получены в работе [23]: при расчётах с использованием эффективной дозы величина радиационных рисков была занижена в 1,5 раза у взрослых и в 4 раза у детей (КТ грудного отдела). Важно подчеркнуть, что любая оценка на основе эффективной дозы является лишь общей, и различие в несколько мЗв не подразумевает любые истинные различия в биологическом риске [21]. Ошибки в оценке радиационного риска для компьютерной томографии при расчётах с использованием эффективной дозы не позволяют сделать значимые выводы на основе различия в дозах в несколько мЗв [28, 29]. Такие расчёты нужно использовать с осторожностью, так как они не отражают индивидуальный риск и не подходят для оценки вреда здоровью человека в каждом отдельном случае. Эффективную дозу нельзя использовать для эпидемиологических исследований из-за большого числа неопределённостей и допущений, она не отражает половозрастную зависимость и не учитывает размеры человека.

В статье [30] авторы представили метод оценки радиационных рисков на основе эквивалентных доз при КТ-сканировании различных органов, для расчёта использовали величину DLP (Dose Length Product – мера поглощённой дозы облучения за всё КТ-исследование). Предложенный метод для перехода от DLP к органным дозам был использован для оценки пожизненного атрибутивного риска развития рака у женщины после её однократного облучения КТ в возрасте 30 лет. Результат сравнили с рисками, оценёнными с помощью органных доз, измеренных маленькими (<7 мм в ширине) силиконовыми фотодиодными дозиметрами (34 в общей сложности), которые были имплантированы в различные органы и ткани фантома взрослого человека. Эти величины органных доз были взяты для процедуры сканирования грудного отдела из работы [31]. Авторы показали, что пожизненный атрибутивный риск, рассчитанный с помощью органных доз, полученных с использованием DLP, сравним с риском, рассчитанным с помощью органных доз, измеренных дозиметрами в фантоме. Отличие не превышает значения 30%.

Оценки радиационных рисков в результате компьютерной томографии

Распространённой причиной использования компьютерной томографии является диагностика травм различной степени тяжести [32]. При этом средняя накопленная доза пациента составляет 19,4 мЗв, а величина пожизненного атрибутивного риска заболеть раком – 0,14%, риски более 1%, как правило, имеют пациенты при многократном КТ-сканировании в возрасте старше 30 лет [32]. Кроме того, в последние годы для выявления различной патологии всё больше людей проходят компьютерную томографию всего тела. Это связано с тем, что ранняя диагностика таких заболеваний как рак лёгкого, различные заболевания сердца, рак толстой кишки и т.д. позволяют спасти жизнь пациента. Важно отметить, что пока нет научных исследований, представивших доказательство эффективности КТ для ранней диагностики различных онкологических заболеваний и, соответственно, повышения выживаемости [33]. Исследований потенциальной эффективности КТ-скрининга для выявления онкологических заболеваний и потенциального вреда медицинского облучения для диагностических целей очень мало.

Одним из главных методов оценки радиационных рисков в результате компьютерной томографии является умножение риска заболеваемости или смертности на единицу дозы (для каждого конкретного органа или ткани, с учётом половозрастной зависимости) на дозу облучения, полученную при КТ. Затем происходит суммирование полученных рисков по всем органам и тканям, чтобы получить итоговый общий риск заболеваемости или смертности человека в результате прохождения компьютерной томографии. Оценки смертности радиационных рисков (в зависимости от органа или ткани) представлены в публикации Комитета по изучению биологических эффектов ионизирующего излучения BEIR V [34] и в Публикации 60 МКРЗ [35]. Обе оценки выполнены с использованием модели относительного риска, которая учитывает пол и возраст при облучении, а также предполагает линейную экстраполяцию рисков от области малых доз до области средних доз. Величина органной дозы при КТ зависит от типа исследования и используемого оборудования. Есть несколько способов оценки органных доз на основе параметров используемых КТ-сканеров. Например, дозиметрический калькулятор ImPACT (The Imaging Performance Assessment of CT) или программа CT-Expo. Доза облучения при компьютерной томографии выше дозы облучения рентгенографии или флюороскопии. Типичные дозы при однократном КТ-обследовании всего тела составляют около 16 мГр на лёгкие, 14 мГр на органы пищеварения и 10 мГр на костный мозг. Эффективная доза, которая является средневзвешенной по всем органам и тканям [36], составляет около 12 мЗв. А в течение жизни человек может пройти несколько подобных исследований. Если рассмотреть в перспективе, к чему может привести многократное облучение такими дозами, можно сослаться на работу [37], в которой показано статистически значимое увеличение риска заболеваемости всеми солидными раками среди выживших после бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, в дозовых группах от 5 до 100 мЗв (средняя доза 29 мЗв). В исследовании [36] было показано, что при однократном КТ-обследовании всего тела 45-летнего мужчины избыточный риск онкологической смертности составит 0,08% ($8 \cdot 10^{-4}$), при этом рак лёгкого может стать главной причиной смерти в данном контексте. При ежегодном прохождении компьютерной томографии всего тела, начиная с 45 и до 74 лет включительно, т.е. при 30 обследованиях в течение жизни, избыточный онкологический риск смертности будет 1,9%.

Другой распространённый способ оценки пожизненного атрибутивного риска в результате прохождения компьютерной томографии является метод, представленный в Публикации 103 МКРЗ. Согласно этой методике можно вычислить избыточный абсолютный риск заболеваемости солидным раком определённой локализации после облучения заданной дозой. Этот риск вычисляется как взвешенное среднее по мультипликативной и аддитивной моделям МКРЗ. Используются модели относительного риска (ERR) и абсолютного риска (EAR), вероятности спонтанной заболеваемости в облучённой популяции и функция здорового дожития облучённой популяции [21, 38]. Пример расчёта величины пожизненных атрибутивных рисков (LAR) и пожизненного коэффициента этиологической доли (LARF) для многократного прохождения компьютерной томографии с использованием данной модели и эквивалентных доз рассматривается авторами [28]. В результате 5 различных процедур КТ в течение жизни женщиной в возрастах 20, 25, 30, 45 и 50 лет, было показано, что реальная оценка величины ARF может составлять до 3%, или 1 случай рака, ЗНО в год на 10 тыс. процедур КТ. Для некоторых типов КТ-сканирований оценка ARF может быть в несколько раз выше. При ARF более 10% (1 случай ЗНО в год на 3 тыс. процедур КТ) избыточное число случаев ЗНО уже является наблюдаемым, т.е. может быть выявлено простыми статистическими методами [39].

В табл. 2 представлены значения величин радиационных рисков и доз облучения для различных типов исследований с использованием компьютерной томографии.

Таблица 2

Сводная таблица медицинского облучения при компьютерной томографии

Тип процедур	Величина риска	Доза облучения
Компьютерная томография (рассматривались все области сканирования, однократное прохождение) [40]	Средний LAR $0,1 \pm 0,2\%$ (ДИ 0,6%) при $LAR_{\max}=3,4\%$	Средняя эффективная доза – $22,5 \pm 25,0$ мЗв
Компьютерная томография (рассматривались все области сканирования, многократное прохождение в течение жизни) [41]	1) Заболеваемость: средний LAR=0,3%; ($LAR_{\max}=12\%$) На одну процедуру LAR=0,7% 2) Смертность: средний LAR=0,2%; ($LAR_{\max}=6,8\%$). На одну процедуру LAR=1%	Более 15% пациентов имело накопленную дозу более 100 мЗв, 4% имело дозу 250-1375 мЗв
Компьютерная томография (КТ грудной клетки, однократное прохождение) [42]	Риск развития рака молочной железы: LAR (15-29 лет)=0,05%; LAR (60-79 лет)=0,001%	1) Средняя органная доза (молочная железа) 15 мГр (мин – 6,5 мГр, макс – 28 мГр) 2) Средняя эффективная доза (молочная железа) 7 мЗв (мин – 3 мЗв, макс – 14,7 мЗв)
Компьютерная томография (рассматривались все области сканирования, многократное прохождение в течение жизни) [43]	1) Заболеваемость: средний LAR=0,14%; ($LAR_{\max}=5,7\%$) 2) Смертность: средний LAR=0,085%; ($LAR_{\max}=2,2\%$)	
Компьютерная томография (КТ грудной клетки, малого таза, брюшной полости; многократное и однократное прохождение) [36]	1) Одна КТ процедура (мужчина 45 лет) LAR=0,08% для риска смертности 2) 30 ежегодных процедур (мужчина, начиная с 45 лет) 1,9% для риска смертности	Органная доза на лёгкие и желудок (1 сканирование) – 14-21 мГр

Данные табл. 2 показывают, что величина радиационных рисков при однократном КТ-сканировании, как правило, находится в диапазоне низкого риска, но увеличение числа КТ-сканирований за одну процедуру, а также увеличение числа процедур на одного пациента, могут привести к существенному повышению LAR.

Медицинское облучение при радионуклидной диагностике

В последние годы возросло число исследований, посвящённых оценке радиационных рисков медицинского облучения пациентов при проведении радиологических процедур. Но следует отметить, что единого подхода в решении данного вопроса не существует. Всё больше внимания уделяется вопросу оценки вреда здоровью пациентов в случаях применения радиационных технологий в диагностических целях в медицине. Данная проблема отражена в международных и российских рекомендациях. Несмотря на то, что КТ в России вносит наибольший вклад в годовую эффективную дозу от всех медицинских диагностических процедур, всё большее распространение получают методы диагностики ядерной медицины, в частности, ПЭТ-КТ и другие. ПЭТ-КТ всё чаще используется для диагностики других, неонкологических заболеваний [44]. Потенциал ПЭТ и ПЭТ-КТ в значительной степени определяется арсеналом доступных меченых соединений – радиофармпрепаратов (РФП). Именно выбор подходящего РФП позволяет изучать с помощью ПЭТ такие разные процессы как метаболизм, транспорт веществ, лиганд-рецепторные взаимодействия, экспрессию генов и т.д. С помощью позитронно-эмиссионной томографии можно обнаружить онкологические заболевания на раннем этапе, до начала прогрессирования заболевания. При этом дозы облучения при ПЭТ сравнимы с дозами при КТ [45, 46]. В исследовании [47] установили, что однократное ПЭТ-КТ процедура несёт меньший

радиационный ущерб, чем простая компьютерная томография. Авторы объясняют это тем, что число сканирований за одну процедуру при КТ больше, чем при ПЭТ-КТ. За счёт введения РФП компьютерная томография в сочетании с ПЭТ определяет более точно локализацию опухоли за меньшее число сканирований за одну процедуру, чем простая компьютерная томография. При этом величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) при ПЭТ-КТ находятся в диапазоне умеренного или низкого риска. При использовании ^{18}F -FDG (фтордезоксиглюкоза) риск заболеваемости раком для мужчин в возрастах 5, 25, 50 и 75 лет равен соответственно 0,0021; 0,0010; 0,0008 и 0,0003. При использовании $^{99\text{m}}\text{Tc}$ риск заболеваемости раком для мужчин в возрастах 5, 25, 50 и 75 лет равен соответственно 0,00059; 0,00034; 0,00027 и 0,00013. При использовании ^{131}I (при введении 3,7 ГБк) риск заболеваемости раком для мужчин в возрастах 25, 50 и 75 лет равен соответственно 0,041; 0,029 и 0,012. При использовании ^{223}Ra (при введении 21,9 МБк) риск заболеваемости раком для мужчин в возрастах 25, 50 и 75 лет равен соответственно 0,31; 0,21 и 0,09 [48]. Но в связи со спецификой использования РФП, радиационный ущерб отдельному критическому органу или ткани при ПЭТ-КТ может быть как выше, так и ниже, чем при КТ. В настоящее время для ПЭТ-обследования применяются позитрон-излучающие изотопы элементов второго периода периодической системы:

^{11}C ($T_{1/2}=20,4$ мин);

^{13}N ($T_{1/2}=9,96$ мин);

^{15}O ($T_{1/2}=2,03$ мин);

^{18}F ($T_{1/2}=109,8$ мин).

Наиболее часто применяемый изотоп – это ^{18}F (^{18}F -FDG), он обладает оптимальными характеристиками для использования при ПЭТ [49]. С одной стороны, относительно короткий период полураспада ^{18}F позволяет получать ПЭТ-изображения высокой контрастности при низкой дозовой нагрузке на пациентов. Низкая энергия позитронного излучения обеспечивает высокое пространственное разрешение ПЭТ-изображений. С другой стороны, период полураспада ^{18}F достаточно велик, чтобы обеспечить возможность транспортировки РФП на основе ^{18}F из централизованного места производства в клиники и институты, имеющие ПЭТ-сканеры. Большинство исследований указывает на оправданность применения ПЭТ, ПЭТ-КТ, особенно для больных раком, хотя авторы и отмечают, что подобные исследования должны применяться с осторожностью особенно в детском возрасте [50-53]. Нужно отметить, что для оценки радиационных рисков при радионуклидной диагностике в детском возрасте применяются в основном методы, основанные на эффективной дозе, а также методы, разработанные для взрослого населения. Это может быть неприменимо для детей и давать неверные результаты [54, 55].

Выводы

В последние годы с развитием технологий наблюдается тенденция к снижению годовой эффективной дозы медицинского облучения. Если в 2012 г. доза медицинского облучения составляла 0,55 мЗв, т.е. 14,2% от годовой эффективной дозы (3,9 мЗв), в 2017 г. эта величина – 0,51 мЗв – 13,6% от средней годовой эффективной дозы (3,7 мЗв). При этом частота медицинских радиологических процедур растёт из года в год. Так, в 2012 г. на долю каждого жителя России приходилось в среднем 1,74 процедуры на человека, а в 2017 г. – уже 1,9 процедуры на человека. Причём рост числа процедур происходит в первую очередь за счёт более широкого применения компьютерной томографии. В 2012 г. КТ вносила 29,6% в суммарную коллективную

дозу медицинского облучения, но в 2017 г. эта цифра возросла до 47,8%. Как показывают последние исследования, радиационные риски при однократном КТ-обследовании низки, но при многократном КТ-обследовании вероятность заболеть раком в будущем значительно выше. После медицинского облучения человека при прохождении компьютерной томографии избыточный риск заболеваемости злокачественными новообразованиями обычно низок и составляет 1 радиационно-обусловленный случай в год на 30 тыс. процедур КТ. При этом максимальный избыточный риск заболеваемости злокачественными новообразованиями может достигать величины – 1 радиационно-обусловленный случай в год на 3 тыс. и процедур КТ, а в некоторых случаях даже выше. Такие риски являются наблюдаемыми и уже могут быть выявлены на эпидемиологическом уровне. Важно отметить, что увеличение риска сканирований за одну процедуру КТ или ПЭТ-КТ, а также увеличение числа процедур на одного пациента, должны применяться с осторожностью, с оценкой пользы радиологического обследования и потенциального риска развития ЗНО, особенно при использовании радиологических процедур в детском возрасте.

Заключение

В связи с постоянным увеличением частоты использования радиационных технологий в медицинской диагностике остаётся актуальным вопрос обеспечения безопасности диагностического облучения. Единый метод оценки радиационных рисков медицинского облучения до настоящего времени не выработан. Применяются различные методики, которые либо не подходят для оценки индивидуальных рисков, либо они сложны для практического применения. При этом международные нормы безопасности требуют, чтобы пациент был проинформирован о возможных неблагоприятных последствиях радиологической процедуры и рисках, с ней связанных. Создание методов индивидуальной оценки риска медицинского диагностического облучения и оценки соотношения польза/вред для обоснования использования медицинского облучения в диагностических целях, является ключевым вопросом, который необходимо решить в ближайшие годы.

Литература

1. **Пономарёва Т.В., Кальницкий С.А., Вишнякова Н.М.** Медицинское облучение и стратегия его профилактики //Радиационная гигиена. 2008. Т. 1, № 1. С. 63-68.
2. **Калистратова В.С.** Роль мощности дозы в появлении стохастических эффектов и сокращении продолжительности жизни при действии инкорпорированных радионуклидов и источников внешнего излучения //Мед. радиология и рад. безопасность. 2004. Т. 49, № 3. С. 5-27.
3. **Цыб А.Ф., Иванов В.К., Бирюков А.П.** Возможности радиационной эпидемиологии при решении проблем радиационной безопасности медицинского облучения //Радиация и риск. 2008. Т. 17, № 2. С. 50-62.
4. Дозы облучения населения Российской Федерации в 2016 году: информационный сборник. СПб.: НИИРГ им. П.В. Рамзаева, 2017. 125 с.
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
6. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации Минздрава России, 2010.
7. **Дубинкин Д.О.** Развитие ядерной медицины в РФ //Медицина: целевые проекты. 2013. № 16. С. 71-74.
8. Сведения о медицинской организации за 2013 г. по России: Статистическая форма № 30: утв. 14.01.13. М., Росстат, № 13. 22 с.
9. **Братилова А.А., Голиков В.Ю., Кальницкий С.А.** Уровни облучения пациентов при проведении рентгеновской компьютерной томографии в медицинских организациях Санкт-Петербурга и Ленинградской области //Радиационная гигиена. 2014. Т. 7, № 3. С. 33-38.
10. **Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S., Vodovato A.** Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015 //J. Radiol. Prot. 2017. V. 38, N 1. P. 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.
11. Методические рекомендации. Заполнение форм федерального государственного статистического наблюдения № 3-ДОЗ. М.: Роспотребнадзор, 2007. 23 с.
12. Дозы облучения населения Российской Федерации по итогам функционирования ЕСКИД в 2002-2015 гг.: информационный сборник. СПб.: НИИРГ, 2015. 40 с.
13. **Барковский А.Н., Ахматдинов Р.Р., Барышков Н.К., Братилова А.А., Кормановская Т.А., Кувшинников С.И., Репин Л.В., Романович И.К., Стамат И.П., Тутельян О.Е.** Итоги функционирования Единой государственной системы контроля и учёта индивидуальных доз облучения граждан Российской Федерации по данным за 2015 г. //Радиационная гигиена. 2016. Т. 9, № 4. С. 47-73.
14. **Зиматкина Т.И., Малевич Р.О., Вольф С.Б.** Медицинское облучение детей и пути его оптимизации //Новости медико-биологических наук. 2017. Т. 15, № 1. С. 14-19.
15. Лучевая диагностика и лучевая терапия на пороге третьего тысячелетия /под общ. ред. М.М. Власовой. СПб.: Норма, 2003. 463 с.
16. **Белавина Е.А.** Организационно-методическое обеспечение лучевой диагностики и профилактики рака молочной железы у женщин в Санкт-Петербурге: Автореф. дис... канд. мед. наук. СПб., 2006. 20 с.
17. **Вишнякова Н.М.** Частота и уровни облучения пациентов и населения России за счёт лучевой диагностики с применением источников ионизирующего излучения //Радиационная гигиена. 2010. Т. 3, № 3. С. 17-22.
18. **Польский О.Г.** Медицинское облучение: необходимый риск //Безопасность окружающей среды. 2007. № 1. С. 24-27.
19. **Brenner D.J.** We can do better than effective dose for estimating or comparing low-dose radiation risks //Ann. ICRP. 2012. V. 41, N 3-4. P. 124-128. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.07.001.

20. **Игишева А.Л., Литвиненко В.В.** Влияние эффективной дозы облучения при рентгенологических обследованиях на организм человека //Неразрушающий контроль: сборник трудов V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность». В 2 т. Томск, 26-30 мая 2014 г. Томск: ТПУ, 2014. Т. 2. С. 132-134.
21. International Commission on Radiological Protection. 2007 recommendations of the ICRP. Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 24.
22. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105 //Ann. ICRP. 2007. V. 37, N 8. Elsevier, 2007. 63 p.
23. **Balonov M.I., Shrimpton P.C.** Effective dose and risks from medical x-ray procedures //ICRP Publication. 2012. V. 41, N 3-4. P. 129-141. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.06.002.
24. **McCollough C.H., Christner J.A., Kofler J.M.** How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? //Am. J. Roentgenol. 2010. V. 194. P. 890-896. DOI: 10.2214/AJR.09.4179.
25. **Иванов В.К., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Пряхин Е.А., Цыб А.Ф., Меттлер Ф.А.** Ограничение использования эффективной дозы в оценке риска медицинского облучения //АНРИ. 2012. № 3(70). С. 35-44.
26. **Иванов В.К., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Пряхин Е.А., Цыб А.Ф., Меттлер Ф.А.** Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органных доз //Радиация и риск. 2012. Т. 21, № 4. С. 7-23.
27. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Estimation of risk from medical radiation exposure based on effective and organ dose: how much difference is there? //Radiat. Prot. Dosim. 2013. V. 155, N 3. P. 317-328. DOI: 10.1093/rpd/nct008.
28. **Martin C.J.** Effective dose: how should it be applied to medical exposures? //Br. J. Radiol. 2007. V. 80, N 956. P. 639-647.
29. **Shrimpton P.C., Wall B.F., Yoshizumi T.T., Hurwitz L.M., Goodman P.C.** Effective dose and dose-length product in CT //Radiology. 2009. V. 250, N 2. P. 604-605.
30. **Кашеев В.В., Пряхин Е.А., Меняйло А.Н., Чекин С.Ю., Иванов В.К.** Расчёт эквивалентных доз в отдельных органах и тканях и величины пожизненного радиационного риска развития рака при проведении типовых обследований с использованием компьютерной томографии //Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 3. С. 8-20.
31. **Fujii K., Aoyama T., Koyama S., Kawaura C.** Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations //Br. J. Radiol. 2007. V. 80, N 956. P. 657-667.
32. **Kritsaneeapaiboon S., Jutiyon A., Krisanachinda A.** Cumulative radiation exposure and estimated lifetime cancer risk in multiple-injury adult patients undergoing repeated or multiple CTs //Eur. J. Trauma Emerg. Surg. 2018. V. 44, N 1. P. 19-27. DOI: 10.1007/s00068-016-0665-6.
33. **Furtado C.D., Aguirre D.A., Sirlin C.B., Dang D., Stamato S.K., Lee P., Sani F., Brown M.A., Levin D.L., Casola G.** Whole-body CT screening: spectrum of findings and recommendations in 1192 patients //Radiology. 2005. V. 237, N 2. P. 385-394.
34. Nuclear Regulatory Commission. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR V. Washington, DC: National Academy Press, 1990.
35. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the ICRP. Publication 60. Oxford, England: Pergamon, 1991.
36. **Brenner D.J., Elliston C.D.** Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening //Radiology. 2004. V. 232, N 3. P. 735-738.
37. **Pierce D.A., Preston D.L.** Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors //Radiat. Res. 2000. V. 154, N 2. P. 178-186.

38. **Иванов В.К., Меняйло А.Н., Кашеев В.В., Чекин С.Ю., Горский А.И., Максюттов М.А., Туманов К.А.** Сравнительный анализ современных моделей оценки радиационных рисков МКРЗ и НКДАР ООН //АНРИ. 2011. № 3(66). С. 18-29.
39. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Estimating the lifetime risk of cancer associated with multiple CT scans //J. Radiol. Prot. 2014. V. 34, N 4. P. 825-841. DOI: 10.1088/0952-4746/34/4/825.
40. **Slovic B.H., Shah K.H., Yeh D.D., Seethala R., Kaafarani H.M., Eikermann M., Raja A.S., Lee J.** Significant but reasonable radiation exposure from computed tomography-related medical imaging in the ICU //Emerg. Radiol. 2016. V. 23, N 2. P. 141-146. DOI: 10.1007/s10140-015-1373-y.
41. **Sodickson A., Baeyens P.F., Andriole K.P., Prevedello L.M., Nawfel R.D., Hanson R., Khorasani R.** Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults //Radiology. 2009. V. 251, N 1. P. 175-184. DOI: 10.1148/radiol.2511081296.
42. **Lahham A., AlMasri H., Kameel S.** Estimation of female radiation doses and breast cancer risk from chest ct examinations //Radiat. Prot. Dosimetry. 2018. V. 179, N 4. P. 303-309. DOI: 10.1093/rpd/ncx283.
43. **Dijkstra H., Groen J.M., Bongaerts F.A., van der Jagt E.J., de Bock T.G., Greuter M.J.** The cumulative risk of multiple CT exposures using two different methods //Health Phys. 2014. V. 106, N 4. P. 475-483. DOI: 10.1097/HP.0000000000000083.
44. **Parisi M.T., Bermo M.S., Alessio A.M., Sharp S.E., Gelfand M.J., Shulkin B.L.** Optimization of pediatric PET/CT //Semin. Nucl. Med. 2017. V. 47, N 3. P. 258-274. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2017.01.002.
45. **Рудас М.С., Насникова И.Ю., Матякин Г.Г.** Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике. Учебно-методическое пособие. М., 2007. 53 с.
46. **Quinn B., Dauer Z., Pandit-Taskar N., Schoder H., Dauer L.T.** Radiation dosimetry of 18F-FDG PET/CT: incorporating exam-specific parameters in dose estimates //BMC Med. Imaging. 2016. V. 16, N 1. P. 41. DOI: 10.1186/s12880-016-0143-y.
47. **Пряхин Е.А., Кашеев В.В., Меняйло А.Н., Иванов В.К.** Оценка радиационных рисков при однократном прохождении ПЭТ/КТ сканировании //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 2. С. 41-48.
48. **Andersson M., Eckerman K., Mattsson S.** Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine //Phys. Med. Biol. 2017. V. 62, N 24. P. 9177-9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.
49. **Jadvar H., Connolly L.P., Fahey F.H., Shulkin B.L.** PET and PET/CT in pediatric oncology //Semin. Nucl. Med. 2007. V. 37, N 5. P. 316-331.
50. **Nivelstein R.A., Quarles van Ufford H.M., Kwee T.C., Bierings M.B., Ludwig I., Beek F.J., de Klerk J.M., Mali W.P., de Bruin P.W., Geleijns J.** Radiation exposure and mortality risk from CT and PET imaging of patients with malignant lymphoma //Eur. Radiol. 2012. V. 22, N 9. P. 1946-1954. DOI: 10.1007/s00330-012-2447-9.
51. **Fahey F.H., Treves S.T., Adelstein S.J.** Minimizing and communicating radiation risk in pediatric nuclear medicine //J. Nucl. Med. 2011. V. 52, N 8. P. 1240-1251. DOI: 10.2967/jnumed.109.069609.
52. **Chawla S.C., Federman N., Zhang D., Nagata K., Nuthakki S., McNitt-Gray M., Boechat M.I.** Estimated cumulative radiation dose from PET/CT in children with malignancies: a 5-year retrospective review //Pediatr. Radiol. 2010. V. 40, N 5. P. 681-686. DOI: 10.1007/s00247-009-1434-z.
53. Методические рекомендации. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований (МР 2.6.1.0098-15). М.: Роспотребнадзор, 2015.
54. **Fahey F.H., Goodkind A.B., Plyku D., Khamwan K., O'Reilly S.E., Cao X., Frey E.C., Li Y., Bolch W.E., Sgouros G., Treves S.T.** Dose estimation in pediatric nuclear medicine //Semin. Nucl. Med. 2017. V. 47, N 2. P. 118-125. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2016.10.006.
55. **Rehani M.M.** Looking into future: challenges in radiation protection in medicine //Radiat. Prot. Dosimetry. 2015. V. 165, N 1-4. P. 3-6. DOI: 10.1093/rpd/ncv071.

Medical diagnostic imaging: radiation safety issues. Review

Kashcheev V.V., Pryakhin E.A.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

Development of radiological technologies and their use not only for military but for civilian purposes, especially in medicine, necessitates scientifically substantiated assessment of safety of radiological medical procedures for patients. IAEA International safety standards published in 2011 considers three types of radiation exposure situations: planned, emergency and existing, and three categories of radiation exposures: occupational, public and medical. Medical radiological exposure refers to the planned exposure situation, however, it is considered separately. The paper presents the review of published studies of possible health risks from medical radiological procedures, as well as available methods for assessment of health risk from radiological imaging. Fluorography, X-ray radiography, computed tomography (CT). PET, PET-CT are common radiological procedures. CT and radionuclide imaging are the main contributors to the collective dose from radiological procedures; though the annual percent of CT and radionuclide diagnostics is 3.3%, their contribution to the annual radiation dose from all radiological imaging procedures is 47.8%. To date, no unified approach to the assessment of health risks from medical imaging is available. The known methods have their specific limits and assumptions, unsuitable for the assessment of individual health risks, or the methods difficult for practical use. At the same time, in accordance with the international safety standards a patient should be informed of possible adverse effects of radiological procedures and health risks from exposure to radiation. The development of the easy-to-use method for evaluating individual health risk associated with medical imaging is a matter of great importance for radiation protection of a patient. It has to be addressed in the nearest future.

Key words: *medical radiation, nuclear medicine, radionuclide diagnosis, computed tomography (CT), positron emission tomography (PET), lifetime attributable risk (LAR), excess relative risk (ERR), multiple and single exposure, cancer incidence, radiation risk, effective dose*

References

1. **Ponomareva T.V., Kalnitsky S.A., Vishnyakova N.M.** Medical exposure and strategy for its prevention. *Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 63-68. (In Russian).
2. **Kalistratova V.S.** The role of dose rate in the appearance of stochastic effects and reduction of life expectancy under the action of incorporated radionuclides and sources of external radiation. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' – Medical Radiology and Radiation Safety*, 2004, vol. 49, no. 3, pp. 5-27. (In Russian).
3. **Tsyb A.F., Ivanov V.K., Biryukov A.P.** Possibilities of radiation epidemiology in solving problems of radiation safety of medical exposure. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 50-62. (In Russian).
4. The radiation doses to the Russian population in 2016: information collection. St. Petersburg, Ramzaev's NIIRG Publ., 2017. 125 p. (In Russian).
5. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009). Sanitary-epidemiological rules and standards. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p. (In Russian).
6. Basic Sanitary Rules for Radiation Safety (OSPORB-99/2010). Health regulations, SP 2.6.1.2612-10. Moscow, Center for Sanitary and Epidemiological Rationing, Hygienic Certification of Russian Ministry of Health, 2010. (In Russian).
7. **Dubinkin D.O.** The development of nuclear medicine in the Russian Federation. *Meditsina: tselevyye projekty – Medicine: Targeted Projects*, 2013, no. 16, pp. 71-74. (In Russian).
8. Information about the medical organization for 2013. In Russia: Statistical form N 30: approved 01.14.13. Moscow, Rosstat, №13. 22 p. (In Russian).

Kashcheev V.V. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Pryakhin E.A.* – Researcher. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-32-81; e-mail: nrer@obninsk.com.

9. **Bratylova A.A., Golikov V.Yu., Kalnitsky S.A.** Patient irradiation levels during X-ray computed tomography in medical organizations in St. Petersburg and Leningrad oblast. *Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene*, 2014, vol. 7, no. 3, pp. 33-38. (In Russian).
10. **Balonov M., Golikov V., Zvonova I., Chipiga L., Kalnitsky S., Sarycheva S., Vodovato A.** Patient doses from medical examinations in Russia: 2009-2015. *J. Radiol. Prot.*, 2017, vol. 38, no.1, pp. 121-139. DOI: 10.1088/1361-6498/aa9b99.
11. Methodical recommendations. Completing the forms of the federal state statistical observation N 3-DOZ. Moscow, Rospotrebnadzor, 2007. 23 p. (In Russian).
12. Radiation doses to the population of the Russian Federation according to the results of the functioning of ESKID in 2002-2015: information collection. St. Petersburg, Ramzaev's NIIRG Publ., 2015. 40 p.
13. **Barkovsky A.N., Akhmatdinov R.R., Baryshkov N.K., Bratilova A.A., Kormanovskaya T.A., Kuvshinnikov S.I., Repin L.V., Stamat I.P., Tutelyan O.E.** Results of the functioning of the Unified State System of Control and Accounting for Individual Doses of Exposure of Citizens of the Russian Federation according to the 2015 data. *Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 47-73. (In Russian).
14. **Zimatkina T.I., Malevich R.O., Volf S.B.** Medical exposure of children and ways to optimize it. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk – News of Medical and Biological Sciences*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 14-19. (In Russian).
15. Radiation diagnosis and radiation therapy on the threshold of the third millennium. Ed.: M.M. Vlasova. St. Petersburg, Norma, 2003. 468 p. (In Russian).
16. **Belavina E.A.** Organizational and methodological support of radiation diagnosis and prevention of breast cancer in women in St. Petersburg: Author's abstract dis. med. sciences. St. Petersburg, 2006. 20 p. (In Russian).
17. **Vishniakova N.M.** Exposure frequency and levels due to the examination methods using ionizing sources for the patients and population of Russia. *Radiatsionnaya gigiyena – Radiation Hygiene*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 17-22. (In Russian).
18. **Polsky O.G.** Medical exposure: a necessary risk. *Bezopasnost' okruzhayushchey sredy – Environmental Safety*, 2007, no. 1, pp. 24-27. (In Russian).
19. **Brenner D.J.** We can do better than effective dose for estimating or comparing low-dose radiation risks. *Ann. ICRP*, 2012, vol. 41, no. 3-4, pp. 124-128. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.07.001.
20. **Igisheva A.L., Litvinenko V.V.** The effect of effective radiation dose during radiological examinations on the human body. Non-destructive control: a collection of works of the Vth All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists "Non-destructive control: electronic instrumentation, technology, security". In 2 vol., Tomsk, May 26-30, 2014. Tomsk, TPU, 2014, vol. 2, pp. 132-134. (In Russian).
21. International Commission on Radiological Protection. 2007 recommendations of the ICRP. Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 24.
22. Radiological protection in medicine. ICRP Publication 105. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 8. Elsevier, 2007. 63 p.
23. **Balonov M.I., Shrimpton P.C.** Effective dose and risks from medical x-ray procedures. *ICRP Publication*, 2012, vol. 41, no. 3-4, pp. 129-141. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.06.002.
24. **McCullough C.H., Christner J.A., Kofler J.M.** How effective is effective dose as a predictor of radiation risk? *Am. J. Roentgenol.*, 2010, vol. 194, pp. 890-896. DOI: 10.2214/AJR.09.4179.
25. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Limiting the use of an effective dose in assessing the risk of medical exposure. *ANRI*, 2012, no. 3(70), pp. 35-44. (In Russian).

26. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Radiation risk assessment of medical exposure in terms of effective and organ doses. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 7-23. (In Russian).
27. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Estimation of risk from medical radiation exposure based on effective and organ dose: how much difference is there? *Radiat. Prot. Dosim.*, 2013, vol. 155, no. 3, pp. 317-328. DOI: 10.1093/rpd/nct008.
28. **Martin C.J.** Effective dose: how should it be applied to medical exposures? *Br. J. Radiol.*, 2007, vol. 80, no. 956, pp. 639-647.
29. **Shrimpton P.C., Wall B.F., Yoshizumi T.T., Hurwitz L.M., Goodman P.C.** Effective dose and dose-length product in CT. *Radiology*, 2009, vol. 250, no. 2, pp. 604-605.
30. **Kashcheev V.V., Pryakhin E.A., Menyaylo A.N., Chekin S.Yu., Ivanov V.K.** Calculation of equivalent doses to organs and tissues, as well as lifetime attributable risk from typical computed tomography imaging. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2013, vol. 22, no. 3, pp. 8-20. (In Russian).
31. **Fujii K., Aoyama T., Koyama S., Kawaura C.** Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations. *Br. J. Radiol.*, 2007, vol. 80, no. 956, pp. 657-667.
32. **Kritsaneepeaiboon S., Jutiyan A., Krisanachinda A.** Cumulative radiation exposure and estimated lifetime cancer risk in multiple-injury adult patients undergoing repeated or multiple CTs. *Eur. J. Trauma Emerg. Surg.*, 2018, vol. 44, no. 1, pp. 19-27. DOI: 10.1007/s00068-016-0665-6.
33. **Furtado C.D., Aguirre D.A., Sirlin C.B., Dang D., Stamato S.K., Lee P., Sani F., Brown M.A., Levin D.L., Casola G.** Whole-body CT screening: spectrum of findings and recommendations in 1192 patients. *Radiology*, 2005, vol. 237, no. 2, pp. 385-394.
34. Nuclear Regulatory Commission. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR V. Washington, DC, National Academy Press, 1990.
35. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the ICRP. Publication 60. Oxford, England, Pergamon, 1991.
36. **Brenner D.J., Elliston C.D.** Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. *Radiology*, 2004, vol. 232, no. 3, pp. 735-738.
37. **Pierce D.A., Preston D.L.** Radiation-related cancer risks at low doses among atomic bomb survivors. *Radiat. Res.*, 2000, vol. 154, no. 2, pp. 178-186.
38. **Ivanov V.K., Menyaylo A.N., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Gorsky A.I., Maksyutov M.A., Tumanov K.A.** Comparative analysis of modern models of radiation risk assessment of the ICRP and UNSCEAR. *ANRI*, 2011, no. 3(66), pp. 18-29. (In Russian).
39. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.** Estimating the lifetime risk of cancer associated with multiple CT scans. *J. Radiol. Prot.*, 2014, vol. 34, no. 4, pp. 825-841. DOI: 10.1088/0952-4746/34/4/825.
40. **Slovis B.H., Shah K.H., Yeh D.D., Seethala R., Kaafarani H.M., Eikermann M., Raja A.S., Lee J.** Significant but reasonable radiation exposure from computed tomography-related medical imaging in the ICU. *Emerg. Radiol.*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 141-146. DOI: 10.1007/s10140-015-1373-y.
41. **Sodickson A., Baeyens P.F., Andriole K.P., Prevedello L.M., Nawfel R.D., Hanson R., Khorasani R.** Recurrent CT, cumulative radiation exposure, and associated radiation-induced cancer risks from CT of adults. *Radiology*, 2009, vol. 251, no. 1, pp. 175-184. DOI: 10.1148/radiol.2511081296.
42. **Lahham A., AlMasri H., Kameel S.** Estimation of female radiation doses and breast cancer risk from chest CT examinations. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2018, vol. 179, no. 4, pp. 303-309. DOI: 10.1093/rpd/ncx283.
43. **Dijkstra H., Groen J.M., Bongaerts F.A., van der Jagt E.J., de Bock T.G., Greuter M.J.** The cumulative risk of multiple CT exposures using two different methods. *Health Phys.*, 2014, vol. 106, no. 4, pp. 475-483. DOI: 10.1097/HP.0000000000000083.

44. **Parisi M.T., Bermo M.S., Alessio A.M., Sharp S.E., Gelfand M.J., Shulkin B.L.** Optimization of pediatric PET/CT. *Semin. Nucl. Med.*, 2017, vol. 47, no. 3, pp. 258-274. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2017.01.002.
45. **Rudas M.S., Nasnikova I.Yu., Matyakin G.G.** Positron-emission tomography in clinical practice. Teaching manual. Moscow, 2007. 53 p. (In Russian).
46. **Quinn B., Dauer Z., Pandit-Taskar N., Schoder H., Dauer L.T.** Radiation dosimetry of 18F-FDG PET/CT: incorporating exam-specific parameters in dose estimates. *BMC Med. Imaging*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 41. DOI: 10.1186/s12880-016-0143-y.
47. **Pryakhin E.A., Kashcheev V.V., Menyajlo A.N., Ivanov V.K.** Radiation risk assessment in a single PET/CT scan. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 41-48. (In Russian).
48. **Andersson M., Eckerman K., Mattsson S.** Lifetime attributable risk as an alternative to effective dose to describe the risk of cancer for patients in diagnostic and therapeutic nuclear medicine. *Phys. Med. Biol.*, 2017, vol. 62, no. 24, pp. 9177-9188. DOI: 10.1088/1361-6560/aa959c.
49. **Jadvar H., Connolly L.P., Fahey F.H., Shulkin B.L.** PET and PET/CT in pediatric oncology. *Semin. Nucl. Med.*, 2007, vol. 37, no. 5, pp. 316-331.
50. **Nivelstein R.A., Quarles van Ufford H.M., Kwee T.C., Bierings M.B., Ludwig I., Beek F.J., de Klerk J.M., Mali W.P., de Bruin P.W., Geleijns J.** Radiation exposure and mortality risk from CT and PET imaging of patients with malignant lymphoma. *Eur. Radiol.*, 2012, vol. 22, no. 9, pp. 1946-1954. DOI: 10.1007/s00330-012-2447-9.
51. **Fahey F.H., Treves S.T., Adelstein S.J.** Minimizing and communicating radiation risk in pediatric nuclear medicine. *J. Nucl. Med.*, 2011, vol. 52, no. 8, pp. 1240-1251. DOI: 10.2967/jnumed.109.069609.
52. **Chawla S.C., Federman N., Zhang D., Nagata K., Nuthakki S., McNitt-Gray M., Boechat M.I.** Estimated cumulative radiation dose from PET/CT in children with malignancies: a 5-year retrospective review. *Pediatr. Radiol.*, 2010, vol. 40, no. 5, pp. 681-686. DOI: 10.1007/s00247-009-1434-z.
53. Methodical recommendations. Radiation risk assessment in patients during radiological examinations (MR 2.6.1.0098-15). Moscow, Rospotrebnadzor, 2015. (In Russian).
54. **Fahey F.H., Goodkind A.B., Plyku D., Khamwan K., O'Reilly S.E., Cao X., Frey E.C., Li Y., Bolch W.E., Sgouros G., Treves S.T.** Dose estimation in pediatric nuclear medicine. *Semin. Nucl. Med.*, 2017, vol. 47, no. 2, pp. 118-125. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2016.10.006.
55. **Rehani M.M.** Looking into future: challenges in radiation protection in medicine. *Radiat. Prot. Dosimetry*, 2015, vol. 165, no. 1-4, pp. 3-6. DOI: 10.1093/rpd/ncv071.