

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ РИСКОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОФЭКТ/КТ КОСТЕЙ СКЕЛЕТА

Б.Я. Наркевич^{1,2}, А.Д. Рыжков¹, Д.А. Комановская¹, М.Е. Билик¹,
А.С. Крылов¹, С.А. Рыжов^{2,3}

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии
им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

² Ассоциация медицинских физиков России, Москва

³ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских
технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва

В отечественных и зарубежных онкологических клиниках все большее распространение получают гибридные ОФЭКТ/КТ-исследования костей скелета, что обуславливает постоянное возрастание популяционных доз медицинского облучения населения. Ввиду повышенной лучевой нагрузки на пациентов при таких исследованиях необходим контроль рисков радиационно-индуцированных поражений, прежде всего риска возникновения вторичного рака. Для 65 больных с верифицированными метастазами костей скелета были проведены сравнительные исследования индивидуальных оценок радиационного риска, вычисленных по трем различным радиационно-эпидемиологическим моделям на основе предварительно полученных значений эффективных доз внутреннего облучения от радиофармпрепарата при ОФЭКТ и внешнего облучения при рентгеновской КТ. Две из этих моделей основаны на рекомендациях МКРЗ, а третья – на рекомендациях Комитета BEIR (США). Показано, что практически все индивидуальные оценки радиационного риска, рассчитанные по указанным моделям, находятся в пределах категорий низкого и очень низкого риска. Несмотря на некоторое завышение оценок радиационного риска для низкодозовой КТ, для простого и быстрого определения индивидуальных оценок текущего и накопленного радиационного риска рекомендуется использовать радиологический автоматический калькулятор, доступный через Интернет.

Ключевые слова: *ОФЭКТ/КТ, кости скелета, эффективная доза, радиационные риски, радиационно-эпидемиологические модели, сравнительная оценка*

Введение

В настоящее время в онкологических и радиологических клиниках интенсивно развиваются и широко внедряются современные методы лучевой диагностики различных заболеваний. Современные методы диагностической рентгенологии, особенно КТ, интервенционная радиология, ядерная медицина (ОФЭКТ, ПЭТ) и их сочетания более информативны для постановки диагнозов и лечения многих соматических заболеваний, чем традиционные методы медицинской визуализации (рентгенография, скintiграфия). Но для медицинской визуализации

с высоким пространственным и временным разрешением используют более высокие дозы облучения пациентов, чем при применении традиционных методов лучевой диагностики. Наиболее высокодозными являются процедуры интервенционной радиологии под рентгеновским контролем, особенно терапевтические, а также рентгеновская (КТ) и радионуклидная компьютерная томография (ОФЭКТ, ПЭТ).

Применение ионизирующих излучений в диагностической медицине, связанное с облучением пациентов, может приводить и, к со-

жалению, иногда приводит к вредным последствиям для их здоровья. Лучевые поражения (тканевые реакции) кожи и подкожных тканей, а также тканей, прилегающих к опухоли, развивающиеся под действием больших доз излучения, широко известны в лучевой терапии. Процедуры интервенционной рентгенологии, особенно терапевтические, также иногда вызывают лучевые поражения кожи и подкожных тканей.

Отдаленные на годы и десятилетия онкологические и сердечно-сосудистые заболевания могут с определенной, хотя и достаточно низкой вероятностью, возникать у пациентов как побочный эффект лучевой терапии заболеваний, обычно онкологических. Такие стохастические (вероятностные) эффекты наблюдались у тех пациентов, у которых критические по радиочувствительности органы или ткани облучались в дозе около 100 мГр (для сердечно-сосудистых заболеваний – 500 мГр) и более. Канцерогенный эффект радиации проявляется по прошествии минимального латентного периода, составляющего от 2 до 10 лет для разных видов рака, при дозе в соответствующих органах и тканях около 100 мГр и более у взрослых и несколько меньше у детей. При меньших дозах ионизирующего излучения канцерогенный эффект радиации у человека не установлен. Тем не менее, в последние годы было выявлено увеличение онкологической заболеваемости лиц, которым в детстве многократно проводили высокодозную диагностическую КТ. Эти данные послужили причиной повышения внимания к обоснованности назначения и проведения процедур лучевой диагностики.

Кроме того, предполагается, что у потомства облученных пациентов могут также возникать наследственные заболевания, вызванные воздействием ионизирующих излучений. Однако до сих пор такие стохастические эффекты у человека в радиационно-эпидемиологических исследованиях не наблюдались.

Таким образом, при проведении рентгено-радиологических исследований у пациентов имеется определенный вероятностный риск возникновения указанных выше радиационно-индуцированных поражений.

В соответствии с рекомендациями МКРЗ, под радиационным риском для здоровья понимается дополнительная (сверх фоновой или спонтанной) вероятность возникновения онкологического заболевания в течение жизни у

человека (пациента), подвергнувшегося облучению ионизирующим излучением в малых дозах, скорректированная с учетом ущерба для здоровья, что подразумевает учёт тяжести и летальности онкологического заболевания, оценку числа лет потерянной здоровой жизни [1]. Также в оценке риска учитывается дополнительная возможность тяжелого наследственного заболевания у его потомства. Строго говоря, радиационный риск является характеристикой популяции, к которой относится пациент, и не учитывает его (ее) индивидуальную радиочувствительность. Тем не менее, в литературе все чаще стали появляться работы, в которых данная концепция используется для расчета значений индивидуального радиационного риска при диагностическом облучении [2, 3].

К настоящему времени предложено несколько радиационно-эпидемиологических моделей для оценки радиационного риска, в том числе и при медицинском облучении. Наиболее известными из них являются модели, предложенные профильными организациями: МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите), НКДАР ООН (Научный комитет по действию атомной радиации при Организации объединенных наций) и BEIR (Комитет по биологическим эффектам ионизирующей радиации НКРЗ США – Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation).

В общем виде постановка задачи математического определения радиационного риска выглядит следующим образом [4]. При отсутствии облучения основным показателем риска является показатель фоновой или спонтанной заболеваемости λ_0 (число заболевших солидными раками и лейкозами на 100 тыс. человек населения в год). Воздействие радиации, в том числе и диагностическое облучение, приводит к увеличению λ_0 на некоторую дополнительную величину $\delta\lambda$. Тогда полный показатель заболеваемости раком λ будет суммой фоновой и радиационно-индуцированной показателей:

$$\lambda = \lambda_0 + \delta\lambda. \quad (1)$$

Фоновые показатели заболеваемости раком локализации I в общем случае зависят от возраста a и пола s , т.е. $\lambda_0 = \lambda_0(a, I, s)$, а “радиационная добавка” – от полученной дозы D , текущего возраста a , локализации I , пола s и возраста на момент облучения g , т.е. $\delta\lambda = \delta\lambda(g, a, I, s, D)$. Эта радиационная добавка $\delta\lambda$ представляет собой избыточный абсолютный риск EAR (Excess

Absolute Risk) на возраст a при облучении в возрасте g дозой излучения D . Зная избыточный абсолютный риск, можно определить пожизненный атрибутивный риск $LAR(g, I, s, D)$ (Lifetime Attributable Risk) возникновения рака локализации I после однократного диагностического облучения в возрасте g дозой D . Он рассчитывается путем суммирования значений избыточного абсолютного риска по возрасту дожития. Кроме того, необходимо также учесть так называемую функцию здорового дожития, т.е. вероятность дожить в необлученной популяции от возраста g до возраста a , не заболев при этом раком рассматриваемой локализации I . В общем виде это описывается формулой:

$$LAR(g, I, s, D) = \frac{1}{DDREF} \sum_{a=g}^{a_{\max}} S(s, I, g, a) \cdot EAR(g, a, I, s, D), \quad (2)$$

где $S(s, I, g, a)$ – функция здорового дожития, $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, позволяющий учитывать уменьшение риска в случае хронического облучения с малой мощностью дозы или однократного облучения малой дозой. МКРЗ в Публикации 103 рекомендует брать значение этого коэффициента равным 2,0 [1].

Радиационно-эпидемиологические исследования показывают, что радиационные риски LAR , связанные с диагностическим применением ионизирующих излучений, в большинстве случаев незначительны по сравнению с риском для здоровья вследствие неполучения необходимой диагностической информации или получения неполной информации в случае использования других, менее информативных диагностических методов. Однако, как указано выше, имеется ряд рентгенорадиологических диагностических технологий, при использовании которых радиационным риском нельзя пренебрегать. Это тем более существенно, если такие технологии применяются к пациентам, относящимся к более радиочувствительным возрастным-половым группам, особенно к детям.

Радиационно-эпидемиологические исследования показали, что женщины в целом в 1,4 раза чувствительнее мужчин в отношении онкологических последствий облучения. Это различие обусловлено, главным образом, наличием высокой радиочувствительности молочной железы, а также вдвое более высокой

чувствительностью легких и в 4 раза – щитовидной железы у женщин, чем у мужчин.

Для целей радиационной защиты в диапазоне малых доз (меньше 100 мЗв эффективной дозы), в том числе для обоснования проведения процедур лучевой диагностики, общепринятой является линейная беспороговая модель МКРЗ [1]. Согласно этой модели, радиационный риск линейно возрастает в зависимости от дозы облучения, в том числе и при малых дозах. Коэффициент пожизненного радиационного риска рака принимается равным $5,5 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹ для всего населения независимо от пола и возраста, а для взрослых обоим полам в трудоспособном возрасте (18–64 года) – $4,1 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹. Это означает, что если 100 тыс. человек с обычным возрастным-половым распределением получают эффективную дозу по 1 мЗв, то у 5–6 из них через годы или десятилетия онкологические заболевания, индуцированные именно облучением, могут возникнуть и привести к тяжелым последствиям для здоровья.

В дополнение к канцерогенному эффекту радиации в системе радиационной защиты учитываются и возможные вредные наследственные эффекты с коэффициентом пожизненного риска $0,2 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹ для всего населения и $0,1 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹ для взрослых в трудоспособном возрасте.

Линейная зависимость эффекта от дозы, отражающая суть беспороговой концепции действия ионизирующих излучений на биологические объекты, была принята в качестве рабочей гипотезы НКДАР ООН и МКРЗ в основном для обоснования принципов и методов регламентации малых доз облучения. При ее обосновании исходили из теоретически корректных представлений о механизмах взаимодействия излучений с биологическими тканями на молекулярном уровне, которые подтверждают принципиальную возможность беспорогового действия излучений, экспериментальных исследований на биологических моделях *in vitro* и на микроорганизмах, а также из еще одного принципиально важного априорного предположения. Суть его заключается в том, что предполагается правомерной экстраполяция (перенос) данных о канцерогенных эффектах у человека, полученных в условиях воздействия больших доз и больших мощностей доз, на малые дозы и низкие мощности доз излучений.

С целью классификации пожизненного риска для здоровья пациента, связанного с диагностическими исследованиями или лечебными процедурами, используется следующая международная шкала риска:

- ✓ пренебрежимый – меньше 10^{-6} (менее 1 случая на 1 млн чел.);
- ✓ минимальный – 10^{-6} – 10^{-5} (от 1 до 10 случаев на 1 млн чел.);
- ✓ очень низкий – 10^{-5} – 10^{-4} (от 1 до 10 случаев на 100 тыс. чел.);
- ✓ низкий – 10^{-4} – 10^{-3} (от 1 до 10 случаев на 10 тыс. чел.);
- ✓ умеренный – 10^{-3} – $3 \cdot 10^{-3}$ (от 1 до 3 случаев на 1 тыс. чел.);
- ✓ существенный – $3 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-2} (от 3 до 10 случаев на 1 тыс. чел.).

С более высокими уровнями риска, чем низкий риск (т.е. с умеренным и существенным), диагностические рентгенорадиологические исследования, как правило, не связаны.

Как известно, рентгеновская КТ относится к диагностическим технологиям с наиболее высокой лучевой нагрузкой на пациента как по локальным дозам облучения (до 100 мГр), так и по величинам эффективной дозы, характеризующей совокупный радиационно-индуцированный ущерб для организма при неравномерном облучении (до 20 мЗв) [5]. В свою очередь, в онкологических клиниках среди всех радионуклидных диагностических исследований наиболее часто проводят планарную сцинтиграфию и ОФЭКТ скелета целью определения распространенности опухолевого процесса на скелет и выявления отдаленных костных метастазов. При этом эффективные дозы внутреннего облучения пациентов от вводимых в организм остеотропных радиофармпрепаратов становятся сравнимыми с аналогичными дозами внешнего облучения, которые пациенты получают при рентгеновской КТ, хотя и остаются в целом более низкими.

Процедуры рентгеновской КТ и радионуклидной визуализации могут проводиться отдельно и в разное время. Однако такой подход в настоящее время практически полностью вытеснен за счет одновременного проведения указанных процедур на установках для так называемых гибридных исследований, в том числе и для гибридных ОФЭКТ/КТ-исследований. Отличительной особенностью гибридных систем является совмещение данных анатомо-топографической визуализации методом КТ с пространственным накоплением радиофарм-

препарата в исследуемой области тела пациента, измеряемым методом ОФЭКТ. Это дает возможность получения одновременной функционально-структурной оценки исследуемых органов или тканей. Значительные успехи в применении гибридных методов функциональной и структурной визуализации предопределили развитие ОФЭКТ/КТ-систем, занявших за короткое время прочные позиции в ряду диагностических процедур.

С появлением и широким внедрением в клиническую практику гибридных систем медицинской визуализации резко возросло число комбинированных ОФЭКТ/КТ-исследований, из-за чего популяционные дозы медицинского облучения повсеместно возрастают. О важности этих проблем свидетельствует появление официальных рекомендаций МАГАТЭ [6, 7] по клинически обоснованному проведению этих исследований и обеспечению радиационной безопасности пациентов при проведении гибридных ОФЭКТ/КТ-исследованиях именно костей скелета как наиболее часто назначаемых и выполняемых в онкологических клиниках.

В связи с этим целью данной работы являются сравнительная оценка функциональных возможностей и анализ результатов использования трех различных моделей радиационных рисков при проведении гибридных исследований методом ОФЭКТ/КТ костей скелета у онкологических больных.

Материал и методы

Материалом для исследования послужили данные ОФЭКТ/КТ-исследований 65 больных в возрасте от 18 до 80 лет (22 мужчины и 43 женщины) с верифицированными метастазами в костях, проходивших диагностику и лечение в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина. Из них 43 – больные с метастазами рака молочной железы, 11 – рака предстательной железы, 2 – лимфомы, 2 – рака почки, 1 – меланомы, 1 – рака лёгкого, 1 – рака гортани, 1 – семиномы, 1 – мягкотканной опухоли шеи, 2 больных с метастазами злокачественных опухолей без выявленного первичного очага.

Обследования пациентов проводились в два этапа. На первом этапе проводилась планарная сцинтиграфия в режиме всего тела через 3 ч после внутривенного введения остеотропного радиофармпрепарата (РФП), мечен-

ного ^{99m}Tc (технефор или фосфотех). Сцинтиграфия всего тела проводилась в положении больного лежа на спине с использованием коллиматора фотонного излучения низких энергий с высоким разрешением (LEHR). Использовались гамма-камеры Symbia E или T2 фирмы Siemens. Вводимая активность варьировали в зависимости от массы тела пациента в диапазоне 370–740 МБк в соответствии с рекомендациями [8]. Регистрация импульсов проводилась в энергетическом окне $140 \text{ кэВ} \pm 20\%$. Продолжительность планарного сцинтиграфического исследования составляла 13–15 мин (скорость перемещения стола 15 см/мин). После получения сцинтиграфического изображения всего тела производилась визуальная оценка полученного изображения с целью определения размеров и локализации очагов патологического накопления РФП. Эффективная доза внутреннего облучения от радиофармпрепарата, рассчитанная по методическим указаниям МУ 2.6.1.3151-13 [8], составила в среднем $2,58 \pm 0,08 \text{ мЗв}$ ($M \pm m$) с диапазоном варьирования от 2,1 до 4,2 мЗв.

Вторым этапом проводили ОФЭКТ/КТ выбранной зоны интереса, после чего получали эмиссионные радионуклидные и трансмиссионные рентгеновские томограммы исследуемого участка тела, а также совмещённые изображения (fusion). Исследования выполнялись на комбинированной ОФЭКТ/КТ-системе Symbia T2 фирмы Siemens с 2-срезовой конфигурацией КТ (толщина среза 5 мм, шаг спирали 1,5 мм, размер фокусного пятна, согласно IAC 60 360, составлял $0,8 \times 0,4 \text{ мм}/8^\circ$, $0,8 \times 0,7 \text{ мм}/8^\circ$). Использовались следующие параметры ОФЭКТ: матрица 128×128 пикселей, 64 угловые позиции при вращении детекторов, время записи на один угол вращения составило 10 с. Эффективная доза внешнего облучения от КТ, согласно методическим указаниям МУ 2.6.1.2944-11 [9], рассчитывалась по формуле:

$$E = DLP \times K_1 \times K_2, \quad (3)$$

где DLP – произведение дозы на длину сканирования, значение которого выводится на экран томографа, K_1 – поправка возраст пациента, равная 1 для взрослых пациентов, K_2 – поправка на область исследования, равная 0,0054 для шеи, 0,017 – для грудной клетки, 0,015 – для брюшной полости и 0,019 – для ма-

лого таза. Если КТ проводилась в двух или более анатомических областях, то значение общей эффективной дозы от КТ рассчитывали как сумму парциальных доз для этих областей, рассчитанных по формуле (3) с соответствующими значениями поправки K_2 . Усредненная по группе обследованных больных эффективная доза облучения при КТ составила $3,37 \pm 0,07 \text{ мЗв}$, варьируя от 2,60 до 5,74 мЗв. Необходимо подчеркнуть, что такая сравнительно невысокая лучевая нагрузка была обусловлена использованием низкодозового режима КТ (по 2 среза в каждой анатомической области, количество которых, как правило, также не превышало двух), тогда как при не используемом нами диагностическом режиме КТ обычно бывает примерно на порядок выше.

Сравнительная оценка радиационных рисков для указанного контингента больных, прошедших однократное гибридное ОФЭКТ/КТ-исследование, была проведена с использованием следующих трех радиационно-эпидемиологических моделей:

1. Упрощенный способ оценки индивидуального радиационного риска у пациента, подвергаемого медицинскому облучению, был предложен сравнительно недавно в официально утвержденных методических рекомендациях МР 2.6.1.098-15 “Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгено-радиологических исследований” [10]. В них указывается, что оценку избыточного атрибутивного радиационного риска LAR с целью обоснования необходимости проведения диагностического рентгенологического или радионуклидного исследования у лиц определенной возрастной группы можно вычислить на основе концепции эффективной дозы с использованием номинальных коэффициентов риска МКРЗ с поправкой на возрастную радиочувствительность:

$$R(A) = E(A) \times r_n \times k(A), \quad (4)$$

где: $R(A)$ – пожизненный радиационный риск у пациента любого пола в возрасте A (лет) вследствие диагностического рентгенологического или радионуклидного исследования, отн. единиц;

$E(A)$ – эффективная доза у пациента любого пола в возрасте A (лет) от диагностического исследования, мЗв;

r_n – номинальный коэффициент пожизненного радиационного риска, равный $5,7 \cdot 10^{-5}$ мЗв⁻¹ для лиц любого пола и возраста;

$k(A)$ – поправочный множитель на возрастную радиочувствительность, равный 2,3 для детей (до 18 лет), 0,9 для взрослых (18–65 лет) и 0,1 для лиц старшего возраста (старше 65 лет), отн. единиц.

2. В электронном ресурсе [11] был предложен автоматический калькулятор пожизненного радиационного риска, использование которого адаптировано не только для врача-радиолога, но и даже для пациента, планирующего пройти или уже прошедшего то или иное рентгенологическое или радионуклидное диагностическое исследование. В качестве входных данных для калькулятора использованы: 1) тип исследований (в каталоге калькулятора содержатся 13 типовых процедур рентгенографии, 18 – рентгеновской КТ, 5 – рентгеноскопии, 16 – радионуклидной диагностики, 9 – интервенционной радиологии); 2) пол пациента; 3) возраст пациента; 4) количество планируемых или уже проведенных в динамике исследований одного и того же типа; 5) эффективная доза в мЗв (предусмотрена возможность использования величины DLP вместо эффективной дозы E при КТ). Выходные данные расчета представлены в следующем виде: 1) дополнительный риск возникновения радиационно-индуцированного рака в %; дополнительно тот же показатель выражается в более наглядном виде как один шанс радиационно-индуцированного рака из определенного количества человек (обычно на несколько тысяч) того же возраста и пола, прошедших точно такое же исследование; 2) фоновый (эндогенный) риск спонтанного возникновения онкологического заболевания для лиц с теми же конкретными значениями пола и возраста, что и у данного пациента в %; 3) суммарный риск (фоновый + “радиационная добавка”) в % (рис. 1). Предусмотрена возможность суммирования накапливаемых радиационных рисков при однотипных и разнотипных исследованиях. Конкретный алгоритм расчетов на данном калькуляторе не приведен, но указывается, что он базируется на модели Комитета BEIR, работающего под эгидой НКРЗ США [12].

3. В качестве третьей модели были использованы табличные и графические данные по радиационным рискам возникновения радиационно-индуцированного рака, выраженные в процентах (%) на единицу эффективной

Рис. 1. Автоматический калькулятор пожизненно-го радиационного риска

дозы (Зв) и представленные в методических рекомендациях для Великобритании [13]. Указанные данные были рассчитаны по модели МКРЗ [1] отдельно для мужчин и женщин 10 возрастных групп в диапазоне от 0 до 99 лет для 18 типовых рентгеновских исследований, в том числе и для 5 КТ-исследований различных анатомических областей. Дополнительно в те же данные были включены результаты расчетов радиационного риска на единицу поглощенной дозы (Гр) в зависимости от пола и возраста для гипотетической ситуации равномерного облучения всего тела пациента. С определенным приближением можно считать эти результаты вполне пригодными и для вычисления радиационного риска внутреннего облучения от вводимых в организм радиофармпрепаратов при радионуклидной диагностике, у которых ранняя фаза транспорта в организме пациента характеризуется равномерным распределением по всему сосудистому руслу, т.е. с относительно равномерным облучением всего тела пациента. Все данные о возрастной зависимости радиационных рисков для рентгено-радиологических исследований разных типов в рекомендациях представлены только в виде графиков, что несколько затрудняет определение значения радиационного риска для конкретного пациента, снижая точность последующих оценок.

По каждой из трех моделей значения радиационного риска сначала рассчитывались

для внутреннего облучения от радиофармпрепарата, потом определялись аналогичные величины риска для внешнего облучения от КТ, далее эти значения суммировались для каждого пациента, после чего определялись их средние значения для всей выборки.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов избыточного атрибутивного радиационного риска по трем радиационно-эпидемиологическим моделям для исследованной группы больных представлены в табл. 1.

Из табл. 1 можно видеть, что средние значения радиационного риска не выходят за пределы категории низкого риска по всем трем радиационно-эпидемиологическим моделям, а минимальные значения относятся к категории уже очень низкого риска. К категории низкого риска относится 50 наблюдений, а очень низкого риска – 14, в основном для пациентов старше 65 лет. Имеется только единственное наблюдение, для которого расчет на калькуляторе [11] показал значение совокупного радиационного риска $11,39 \times 10^{-4}$, которое уже попадает под категорию умеренного риска. Данный результат относился к молодой женщине в возрасте 25 лет с массой тела 95 кг, что обусловило необходимость введения в организм радиофармпрепарата с более высокой, чем обычно, активностью, а также необходимость режима КТ с более высоким, чем обычно, током рентгеновской трубки. Кроме того, возрастная радиочувствительность сильно повышается с уменьшением возраста на момент облучения, особенно у женщин.

Распределения значений радиационного риска для моделей [10] и [13] с уровнем значимости $p < 0,05$ не различаются между собой по параметрическому критерию Стьюдента и по непараметрическому парному критерию Вилкоксона для связанных выборок. В то же вре-

мя, значения радиационного риска, рассчитанные с калькулятором [11], достоверно по тем же критериям различаются с соответствующими данными, полученными по моделям [10] и [13]. Очевидно, это обусловлено тем, что алгоритмы расчетов по моделям [10] и [13] основаны на одном и том же подходе, предложенном МКРЗ в Публикации 103 [1], тогда как расчеты на калькуляторе [11] базируются на другом подходе в виде модели BEIR [12]. Кроме того, при использовании калькулятора [11] лучевая нагрузка рассчитывается для диагностических режимов КТ, когда для выделенной анатомической области формируются изображения нескольких десятков поперечных срезов для выделенной анатомической области тела пациента. При этом реальная лучевая нагрузка, определяемая нами только для двух срезов в каждой анатомической области, как бы “размазывается” по существенно большему объему виртуального облучения, обуславливая тем самым завышение рассчитываемых оценок риска для КТ.

Необходимо отметить, что приведенные здесь результаты относятся только к однократному исследованию, выполненному методом ОФЭКТ/КТ. Чтобы определить полный радиационный риск для тех же пациентов, необходимо иметь исчерпывающие данные и о других, ранее проведенных им же рентгенорадиологических исследованиях. Кроме того, надо учитывать и вклады в полный риск от естественного радиационного фона, уровни которого зависят от конкретного места проживания пациента и режима его жизни. Хотя все эти данные практически не доступны, можно априорно утверждать, что полный радиационный риск не будет выходить за верхний предел низкого риска, равный 10^{-3} , причем он будет оставаться на 1–2 порядка меньше, чем риск эндогенного возникновения рака, не связанного с воздействием радиации.

Таблица 1

Радиационный риск для пациентов при ОФЭКТ/КТ, рассчитанный по трем радиационно-эпидемиологическим моделям

Модель радиационного риска	Среднее арифметическое, $M \times 10^{-4}$	Стандартная ошибка среднего арифметического, $m \times 10^{-4}$	Максимальное значение радиационного риска, $\times 10^{-4}$	Минимальное значение радиационного риска, $\times 10^{-4}$
МУ 2.6.1-098-15 [10]	2,47	0,15	4,50	0,27
Калькулятор [11]	3,18	0,22	11,39	0,15
Wall et al [13]	2,56	0,13	5,09	0,05

Выводы

1. Исследования гибридным методом ОФЭКТ/КТ получают все большее распространение, что делает их одним из основных источников медицинского облучения населения, обуславливая необходимость контроля рисков возникновения радиационно-индуцированных поражений у пациентов при проведении таких исследований.
2. Несмотря на рекомендации МКРЗ, МАГАТЭ и других профильных организаций относительно некорректности использования радиационно-эпидемиологических моделей для получения индивидуальных оценок радиационного риска при рентгенорадиологических исследованиях, в зарубежной и отечественной литературе появляется все больше работ по адаптации и практическому применению таких моделей для указанной цели.
3. Результаты проведенных нами сравнительных исследований по применению трех различных алгоритмов расчета радиационного риска показали, что оценки риска радиационно-индуцированных поражений при ОФЭКТ/КТ-исследованиях онкологических больных не выходят за пределы категорий низкого и очень низкого риска.
4. Для простого и быстрого получения врачом-радиологом и даже самим пациентом индивидуальной оценки радиационного риска от единственного или от нескольких различных рентгенорадиологических исследований рекомендуется использовать доступный через Интернет калькулятор [11], результаты расчетов на котором обладают хорошей наглядностью и адаптированы к лицам без радиационно-гигиенической подготовки.

Список литературы

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер. с англ. Под общей ред. М.Ф. Киселёва и Н.К.

Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ “Алана”, 2009.

2. Brenner D.J. What we know and what we don't know about cancer risks associated with radiation doses from radiological imaging. *Brit. J. Radiol.* Vol. 87: 20130629, 2014.
3. Brix G., Nekolla E.A., Borowski M., Noßke D. Radiation risk and protection of patients in clinical SPECT/CT // *Eur. J. Nucl. Med. and Molec. Imaging.* 2014. Vol. 41. Suppl. 1. P. 125–136.
4. Иванов В.К., Цыб А.Ф., Метлер Ф.А. и соавт. Радиационные риски медицинского облучения // *Радиация и риск.* 2011. Т. 20. № 2. С. 17–28.
5. AAPM: American Association of Physicists in Medicine (2008). The measurement, reporting, and management of radiation dose in CT. AAPM Report No 96.
6. Clinical Applications of SPECT/CT: New Hybrid Nuclear Medicine Imaging System. IAEA-TECDOC-1597. – Vienna, IAEA, 2008.
7. Atlas of Skeletal SPECT/CT Clinical Images. IAEA STI/PUB/1748. – Vienna, IAEA, 2016.
8. МУ 2.6.1.3151–13. Оценка и учет эффективных доз у пациентов при проведении радионуклидных диагностических исследований.
9. МУ 2.6.1.2944–11. Контроль эффективных доз облучения пациентов при проведении медицинских рентгенологических исследований.
10. МР 2.6.1.0098–15. Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований.
11. <http://www.xrayrisk.com/about.php>
12. National Research Council. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR VII Phase 2. – Washington, DC: National Academies Press; 2006.
13. Wall B.F., Haylock R., Jansen J.T.M. et al. Radiation Risks from Medical X-ray Examinations as a Function of Age and Sex of the Patient. Health Protection Agency report CRCE-028, 2011.

ESTIMATION OF RADIATION RISKS IN SPECT/CT OF SKELET BONES

B.Ya. Narkevich^{1,2}, A.D. Ryzhkov¹, D.A. Komanovskaya¹, M.E. Bilik¹,
A.S. Krylov¹, S.A. Ryzhov^{2,3}

¹ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

² Association of Medical Physicists of Russia, Moscow, Russia

³ Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies
of the Moscow Department of Health, Moscow, Russia

Hybrid SPECT/CT examinations of the bones of the skeleton are becoming increasingly common in domestic and foreign oncologic clinics, which lead to a constant increase in the population doses of medical exposure of the population. Due to the increased radiation exposure of patients, such studies require monitoring the risks of radiation-induced lesions, especially the risk of secondary cancer. For 65 patients with verified metastases of the skeletal bones, comparative studies of individual radiation risk assessments were performed, calculated on three different radiation-epidemiological models based on previously obtained values of effective internal dose from the radiopharmaceutical with SPECT and external dose with X-ray CT. Two of these models are based on the recommendations of the ICRP, and the third is based on the recommendations of the BEIR Committee (USA). It is shown that almost all individual radiation risk assessments calculated by these models are within the categories of low and very low risk. Despite some overestimation of radiation risk assessments for low-dose CT, it is recommended to use a radiological automatic calculator available via the Internet for simple and quick determination of individual estimates of current and cumulative radiation risk.

Key words: *SPECT/CT, skelet bones, effective dose, radiation risks, radiation-epidemiological models, comparative*

E-mail: narvik@yandex.ru