РАЗДЕЛ 2 НАУЧНЫЕ СТАТЬИ

Оценка радиационного риска медицинского облучения в терминах эффективной и органных доз

Иванов В.К., Кащеев В.В., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Пряхин Е.А., Цыб А.Ф., Метлер Ф.А.[1]

ФГБУ МРНЦ Минздрава России, Обнинск;
[1] Отдел радиологии и ядерной медицины, Служба здравоохранения Нью-Мексико, США

В работе даются оценки радиационных рисков возможных онкологических заболеваний при проведении диагностических рентгенорадиологических процедур на основе органных и эффективной доз. С использованием модели МКРЗ (Публикация 103) и национальных данных медицинской статистики на примере компьютерной томографии приведены оценки пожизненного атрибутивного риска. Показано, что величины пожизненного атрибутивного риска, полученные на основе органных и эффективной доз, могут отличаться в 3,11 раза. Получены также оценки величины пожизненного атрибутивного риска онкологических заболеваний для отдельных органов.

Ключевые слова: *радиационные риски, компьютерная томография, органные и эффективная дозы, пожизненный атрибутивный риск.*

В Международных основных нормах безопасности, выпущенных МАГАТЭ в 2011 г. [8], отмечается (п. 3.150), что «ни один пациент … не подвергается медицинскому облучению, если … он не информирован … о рисках, связанных с воздействием излучения». Это требование также отражено в принятых в России Нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) [4] и в «Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010)» [5]. Таким образом, впервые на международном и национальном уровнях чётко обозначено требование оценки риска возможных стохастических эффектов при планировании медицинского рентгенорадиологического облучения. Понятно, что это требование в настоящее время имеет повышенную актуальность в связи с широким внедрением, в частности, современных технологий компьютерной томографии, особенно в педиатрии [3].

В результате проведения крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований (Хиросима-Нагасаки, Чернобыль, регистры атомных работников и др.) установлено, что радиационный риск стохастических (прежде всего онкологических) эффектов определяется многими индивидуальными характеристиками: пол, возраст при облучении, достигнутый возраст, рассматриваемая локализация опухоли и др. Вместе с тем, в основе оценки радиационных рисков лежит базовая зависимость «доза-эффект», поэтому данные о дозах облучения играют особую и первостепенную роль в оценке возможных отдалённых радиологических эффектов [9, 10, 13].

Иванов В.К.* – Председатель РНКРЗ, зам. директора по научн. работе, член-корр. РАМН; **Кащеев В.В.** – ст. научн. сотр., к.б.н.; **Чекин С.Ю.** – ст. научн. сотр.; **Меняйло А.Н.** – аспирант; **Пряхин Е.А.** – аспирант; **Цыб А.Ф.** – директор, академик РАМН. ФГБУ МРНЦ Минздрава России. **Метлер Ф.А.** – MD, отдел радиологии и ядерной медицины, Служба здравоохранения Нью-Мексико, США.
*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (48439) 9-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.

В 103 Публикации МКРЗ (п. 340) отмечается, что «оценку риска медицинской диагностики и лечения с использованием ионизирующего излучения лучше всего проводить, используя соответствующие значения риска для отдельных тканей под риском… Эффективная доза может быть полезна для относительного сравнения доз от различных диагностических процедур и для сравнения применения аналогичных технологий и процедур исследования в различных лечебных учреждениях» [15]. В 105 Публикации МКРЗ, посвящённой конкретно радиационной защите в медицине, ограничение по использованию эффективной дозы для рискового анализа даётся более жёстко (п. 31): «… её (эффективную дозу) не следует использовать для оценки риска стохастических эффектов…» [14].

Таким образом, в вышедших недавно международных и национальных стандартах и рекомендациях указывается на необходимость оценки радиационных рисков при медицинском облучении и ограничении использования для этих целей величины эффективной дозы.

Вместе с тем, оценка радиационных рисков по эффективной дозе продолжает использоваться на практике, что делает необходимым определение на численном уровне отличий в пожизненном радиационном риске, полученном на основе эффективной и органных доз. Эта необходимость вызвана также тем, что в сети Интернет уже рекламируются ориентированные на врачей-радиологов компьютерные коды, использующие эффективную дозу для прогноза возможных стохастических эффектов медицинского облучения [7].

Представленная работа посвящена определению отличий в оценке радиационного риска на основе органных и эффективной доз облучения на примере планирования диагностической процедуры с использованием компьютерной томографии.

Модель оценки радиационного риска

В радиационной эпидемиологии в отсутствие облучения основной величиной, характеризующей вероятность развития онкологического заболевания, является показатель фоновой или спонтанной онкологической заболеваемости λ_0 (число онкологических заболеваний в год, обычно приведённое на 100 тыс. человек). Эта величина, зависящая от экологических, демографических и социальных факторов, в общем случае является функцией достигнутого возраста a, пола s, локализации опухоли T и календарного года. Воздействие радиации приводит к увеличению λ_0 на дополнительную величину, называемую избыточным абсолютным риском EAR (Excess Absolute Risk). Эта величина зависит, прежде всего, от дозы облучения, а так же может зависеть от возраста при облучении, от достигнутого возраста и от других факторов. При условии нормировании избыточного абсолютного риска на 1 человека можно записать, что:

$$EAR = \frac{\lambda - \lambda_0}{10^5}.$$

Здесь λ – полный или суммарный показатель заболеваемости раком (с учётом радиационно-обусловленной заболеваемости), приведённый на 100 тыс. человек.

В данной работе риски заболеваемости раком, связанные с облучением, которому подвергаются пациенты в результате обследования, например, на компьютерном томографе, оцениваются на основе современной модели МКРЗ, Публикация 103 [15]. Эта модель в целом основывается на результатах долгосрочных (с 1958 по 1998 гг.) эпидемиологических наблюдений

за когортой выживших после атомной бомбардировки в 1945 г. жителей городов Хиросима и Нагасаки (Япония). Модель МКРЗ позволяет определить избыточный абсолютный риск (EAR) заболеваемости всеми солидными типами рака, а так же отдельно по локализациям опухоли: пищевода, желудка, толстого кишечника и др. как функции от пола, возраста при облучении и достигнутого возраста, а так же дозы облучения [2, 11].

Зная избыточный абсолютный риск можно оценить пожизненный риск возникновения рака исследуемой локализации после однократного облучения заданной дозой. Он рассчитывается суммированием значений избыточного абсолютного риска по достигнутому возрасту, т.е. по следующей формуле:

$$LAR(g,T,s,D) = \frac{1}{DDREF} \cdot \sum_{a=g}^{a_{max}} S(g,a,T,s) \cdot EAR(g,a,T,s,D). \qquad (1)$$

Здесь g – возраст при облучении, a – достигнутый возраст, T – орган или ткань, в которой локализована опухоль, s – пол, $S(g,a,T,s)$ – функция здорового дожития, $DDREF$ – коэффициент эффективности дозы и мощности дозы, учитывающий уменьшение риска в случае хронического облучения или облучения в малой дозе. В МКРЗ в Публикации 103 рекомендуется значение $DDREF$ брать равное 2. Обычно a_{max} выбирается от 85 до 120 лет.

Величина пожизненного риска сильно зависит от того, для какой популяции он вычисляется. Это связано с тем, что функция здорового дожития $S(g,a,T,s)$ и $EAR(g,a,T,s,D)$ зависят от фонового показателя заболеваемости раком. Кроме того, $S(g,a,T,s)$ так же зависит от фоновых показателей смертности от рака и показателей общей фоновой смертности от всех причин. А эти величины, в свою очередь, значительно отличаются для различных стран [12].

На рисунках 1, 2 показаны функции здорового дожития для солидных типов рака для населения России (популяция RF [1]) и усреднённой европейско-американской и азиатской популяции (популяция EAA [15]). В частности, как видно из рисунка 1 (мужчины), в популяции RF около 50 % солидных раков реализуется в возрасте до 65 лет, а в популяции EAA – в возрасте около 80 лет. Понятно, что эти особенности приведут в дальнейшем к существенным отличиям величины пожизненного радиационного риска LAR для этих популяций.

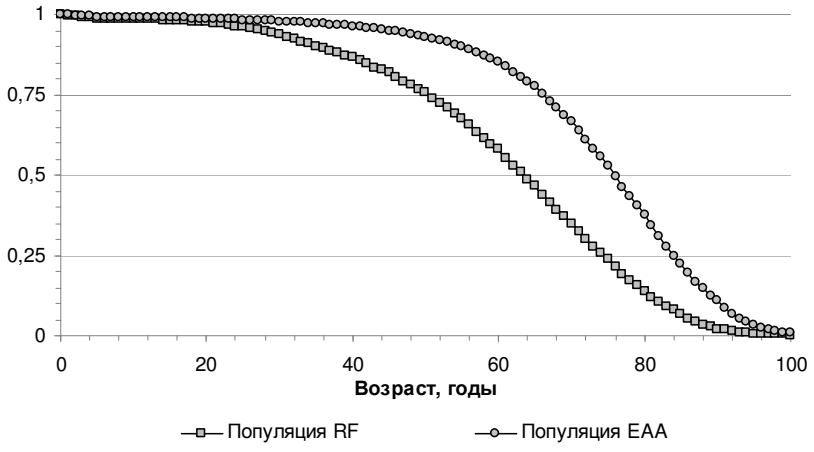

Рис. 1. Функция здорового дожития у мужчин по солидным ракам.

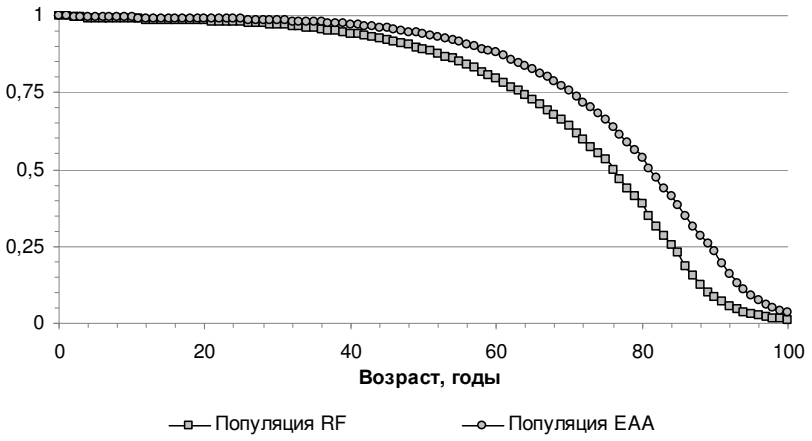

Рис. 2. Функция здорового дожития у женщин по солидным ракам.

Определение пожизненного атрибутивного риска (LAR) с использованием органных и эффективной доз

При наличии конкретных численных значений органных доз (например, при проведении диагностических рентгенорадиологических процедур) величина ***LAR*** определяется следующим образом:

$$LAR_{org}(g,s,\{H_T\}) = \sum_T LAR(g,T,s,H_T), \quad (2)$$

где H_T – органная (эквивалентная) доза в органе T.

Величина пожизненного атрибутивного риска (***LAR***) на основе эффективной дозы E оценивается по формуле:

$$LAR_{eff}(g,s,E) = LAR(g,T = \textit{все солидные раки},s,E), \quad (3)$$

где, как известно, $E = \sum_T w_T \cdot H_T$,

w_T – коэффициент взвешивания для органа (ткани) T [15].

Кроме указанных выше формул для определения LAR_{org} и LAR_{eff} нами введено также их отношение:

$$R(g,s,E,\{H_T\}) = \frac{LAR_{org}(g,s,\{H_T\})}{LAR_{eff}(g,s,E)}. \quad (4)$$

Помимо этого нами рассмотрен так называемый коэффициент этиологической доли заболеваемости ***ARF*** (Attributable Risk Fraction). Эта величина показывает долю (или %) радиационно-обусловленной заболеваемости раком локализации T у людей в достигнутом возрасте a после облучения в возрасте g органа или ткани T дозой H_T. ***ARF*** вычисляется по следующему соотношению:

$$ARF(g,a,T,s,D) = \frac{EAR(g,a,T,s,D)}{EAR(g,a,T,s,D) + \lambda_0(a,T,s)} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Рассмотрим далее применение формул (1)-(5) для условий планирования компьютерной томографии.

Пожизненный атрибутивный риск онкологической заболеваемости после компьютерной томографии

В таблице 1 приведено сравнение величин пожизненного атрибутивного риска (LAR) на 10^{-4} Зв$^{-1}$ для популяций RF и EAA с аналогичными данными 103 Публикации МКРЗ [15]. Легко заметить, что величина LAR для популяции EAA находится в хорошем согласии с данными 103 Публикации МКРЗ. Вместе с тем, величина LAR для популяции RF как в целом по всем ракам, так и по отдельным локализациям, существенно меньше LAR для популяции EAA. Эта разница определяется, прежде всего, серьёзными отличиями этих популяций по функциям здорового дожития, показанным на рисунках 1, 2.

В работе [6] приведены значения органных доз при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов для детей и взрослых. В таблицах 2, 3 показаны основные параметры рассмотренных КТ-сканеров (A-G).

Таблица 1

Величина LAR для популяций RF и EAA, 10^{-4} Зв$^{-1}$

Орган или ткань	Коэффициенты номинального риска МКРЗ (табл. А4.1 [15]), 10^{-4} Зв$^{-1}$	Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10^{-4} Зв$^{-1}$		RF/МКРЗ	EAA/МКРЗ
		RF	EAA		
Пищевод	15	8,0	15,4	0,53	1,03
Желудок	79	53,6	88,0	0,68	1,11
Толстый кишечник	65	31,4	74,2	0,48	1,14
Печень	30	13,9	33,6	0,46	1,12
Лёгкие	114	68,0	127,2	0,60	1,12
Молочная железа	112	75,5	105,6	0,67	0,94
Яичник	11	9,3	11,9	0,85	1,08
Мочевой пузырь	43	22,9	51,5	0,53	1,20
Щитовидная железа	33	31,1	31,3	0,94	0,95
Остальные	144	107,4	154,0	0,75	1,07
Лейкозы	42	58,1	60,9	1,38	1,45
Все раки*	688	479,0	753,6	0,70	1,10

* Исключая рак кожи и кости.

Таблица 2

Параметры КТ-сканеров при обследовании грудного отдела для детей и взрослых [6]

	Сканер						
	A	B	C	D	E	F	G
Напряжение рентгеновской трубки (кВ)	120	120	120	120	120	120	120
Время ротации (с/скан)							
Дети Взрослые	0,5 0,5	0,5 0,5	0,4 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,37	0,33 0,33
Ширина среза (коллимация среза × кол-во срезов)							
Дети Взрослые	2 мм × 8 2 мм × 8	3 мм × 8 4 мм × 8	1 мм × 16 1 мм × 16	1 мм × 16 1 мм × 16	1,5 мм × 16 1,5 мм × 16	1,5 мм × 16 0,75 мм × 16	0,6 мм × 64 0,6 мм × 64
Питч							
Дети Взрослые	0,875 0,875	0,875 0,875	0,9375 0,9375	1,4375 0,9375	1,0 0,75	1,125 1,108	1,4 0,9
Метод автоматической модуляции силы тока							
Дети Взрослые	Real EC	Fixed(100 mA) Real EC	Real EC	Fixed(150 mA) Real EC	Care dose	Care dose 4D	Care dose 4D
Сила тока (мАс)							
Дети Взрослые	58 127	57 106	31 138	52 148	20 101	45 125	97 160

	Сканер						
	A	B	C	D	E	F	G
КТ область сканирования (мм)							
Дети Взрослые	190 280	203 287	200 301	185 308	210 260	196 300	215 300

Таблица 3

Параметры КТ-сканеров при обследовании абдоминального отдела для детей и взрослых [6]

	Сканер						
	A	B	C	D	E	F	G
Напряжение рентгеновской трубки (кВ)	120	120	120	120	120	120	120
Время ротации (с/скан)							
Дети Взрослые	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5	0,5 0,5
Ширина среза (коллимация среза × кол-во срезов)							
Дети Взрослые	2 мм × 8 2 мм × 8	2 мм × 8 4 мм × 8	2 мм × 16 2 мм × 16	2 мм × 16 2 мм × 16	1,5 мм × 16 1,5 мм × 16	1,5 мм × 16 1,5 мм × 16	1,2 мм × 24 0,6 мм × 64
Питч							
Дети Взрослые	0,875 0,875	0,875 0,875	0,9375 0,9375	1,4375 0,9375	1,0 0,75	1,125 0,75	1,15 0,9
Метод автоматической модуляции силы тока							
Дети Взрослые	Real EC	Real EC	Fixed(150 mA) Real EC	Fixed(150 mA) Real EC	Care dose	Care dose 4D	Care dose 4D
Сила тока (мАс)							
Дети Взрослые	40 112	41 150	80 115	52 146	40 102	68 149	82 165
КТ область сканирования (мм)							
Дети Взрослые	280 435	280 420	300 448	250 406	260 400	293 467	293 446

На рисунках 3, 4 показана зависимость величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) от возраста при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов у мальчиков и девочек из популяций RF и EAA, а на рисунках 5, 6 – зависимость LAR от возраста при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов у мужчин и женщин из указанных популяций.

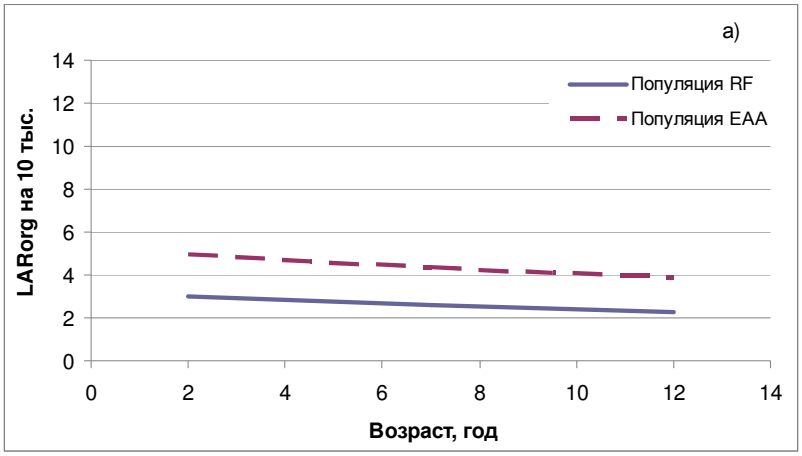

Рис. 3. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии грудного отдела мальчиков (а) и девочек (б) из популяций RF и EAA (сканер A, табл. 2).

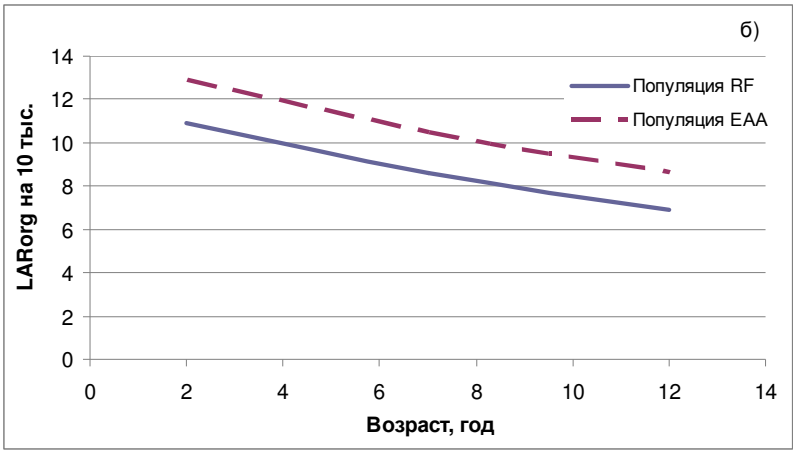

Рис. 3 (окончание). Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии грудного отдела мальчиков (а) и девочек (б) из популяций RF и EAA (сканер А, табл. 2).

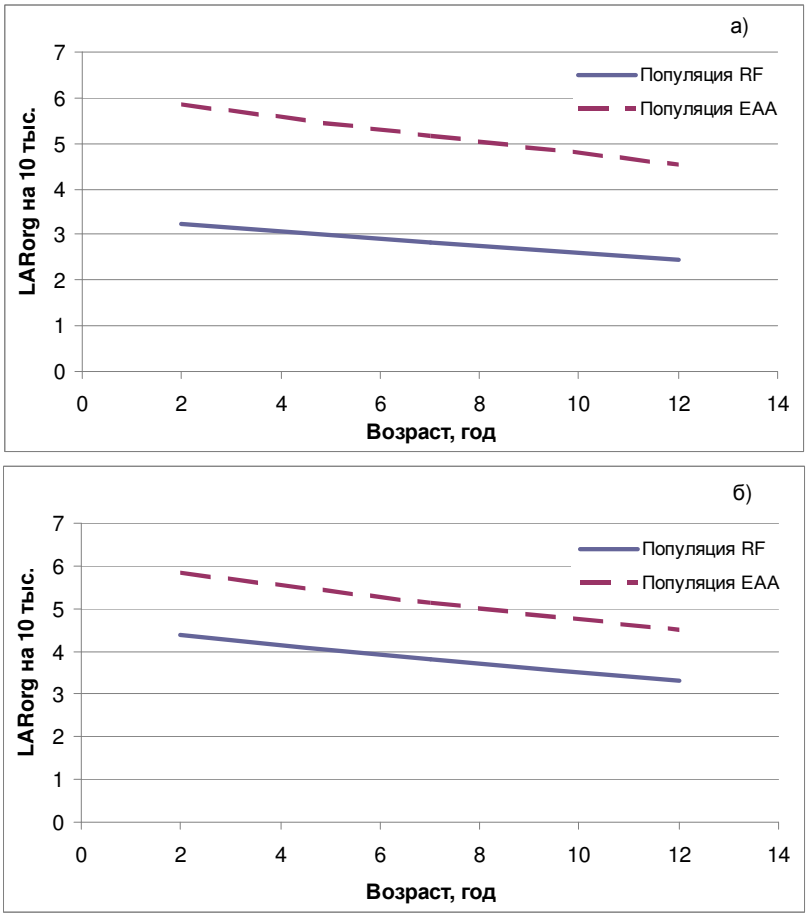

Рис. 4. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии абдоминального отдела мальчиков (а) и девочек (б) из популяций RF и EAA (сканер А, табл. 3).

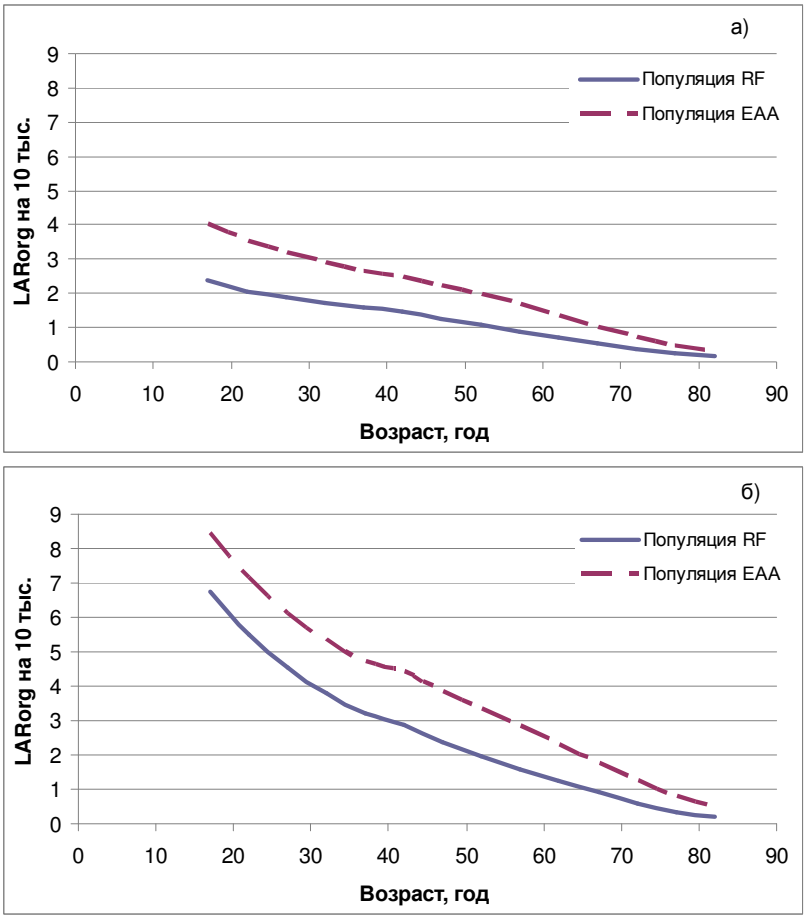

Рис. 5. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии грудного отдела мужчин (а) и женщин (б) из популяций RF и EAA (сканер E, табл. 2).

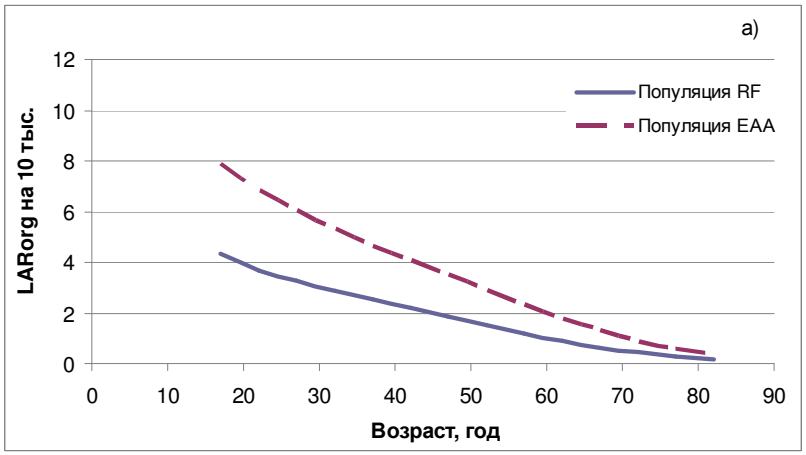

Рис. 6. Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии абдоминального отдела мужчин (а) и женщин (б) из популяций RF и EAA (сканер E, табл. 3).

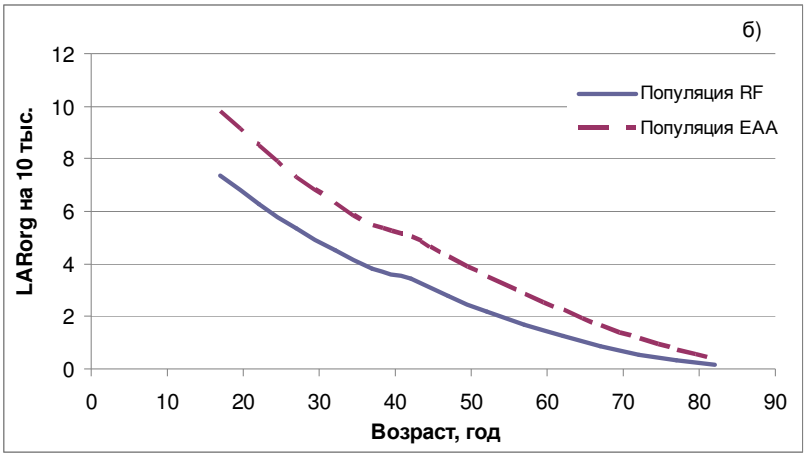

Рис. 6 (окончание). Зависимость LAR_{org} на 10 тыс. человек от возраста при компьютерной томографии абдоминального отдела мужчин (а) и женщин (б) из популяций RF и EAA (сканер E, табл. 3).

В таблицах 4-7 дано отношение LAR_{org} к LAR_{eff}, формулы (2)-(3), для всех типов КТ-сканеров (A-G), для которых органные дозы были получены в работе [6]. Расчёты выполнены для компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов для мужчин и женщин.

Таблица 4

Значение коэффициента $R=LAR_{org}/LAR_{eff}$ для различных возрастных групп из популяций RF и EAA при компьютерной томографии грудного отдела у мужчин

Сканеры														
	A		B		C		D		E		F		G	
Популяция														
	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA
Дети и подростки, лет														
0-4	0,98	1,03	1,05	1,11	1,05	1,10	1,00	1,05	1,10	1,17	1,01	1,05	1,03	1,07
5-9	0,95	1,01	1,00	1,07	1,01	1,07	0,95	1,01	1,04	1,12	0,97	1,03	0,98	1,03
10-14	0,93	0,99	0,96	1,04	0,98	1,05	0,93	1,00	1,01	1,09	0,95	1,01	0,95	1,00
Взрослые, лет														
15-19	0,96	1,01	0,95	1,01	0,94	1,00	0,97	1,03	0,93	1,00	0,98	1,05	0,97	1,03
20-24	0,97	1,03	0,96	1,02	0,95	1,02	0,98	1,05	0,94	1,02	0,99	1,06	0,98	1,04
25-29	1,00	1,06	0,98	1,05	0,97	1,04	0,99	1,07	0,96	1,04	1,00	1,08	1,00	1,07
30-34	1,04	1,11	1,02	1,09	1,00	1,07	1,02	1,10	0,99	1,08	1,02	1,11	1,03	1,11
35-39	1,10	1,17	1,07	1,15	1,04	1,12	1,06	1,15	1,04	1,13	1,06	1,16	1,08	1,17
40-44	1,17	1,25	1,13	1,21	1,09	1,18	1,11	1,21	1,10	1,20	1,11	1,21	1,14	1,24
45-49	1,25	1,35	1,20	1,30	1,16	1,26	1,18	1,28	1,17	1,28	1,17	1,28	1,22	1,32
50-54	1,35	1,46	1,30	1,41	1,24	1,36	1,26	1,38	1,26	1,39	1,24	1,37	1,31	1,43
55-59	1,47	1,61	1,40	1,54	1,34	1,48	1,35	1,49	1,36	1,52	1,33	1,48	1,41	1,56
60-64	1,59	1,76	1,51	1,68	1,43	1,61	1,44	1,61	1,46	1,66	1,42	1,59	1,52	1,71
65-69	1,70	1,91	1,60	1,81	1,52	1,73	1,53	1,73	1,54	1,78	1,49	1,70	1,62	1,84
70-74	1,78	2,02	1,67	1,90	1,57	1,81	1,58	1,81	1,59	1,86	1,54	1,77	1,69	1,94
75-79	1,79	2,06	1,67	1,92	1,57	1,82	1,57	1,82	1,57	1,87	1,52	1,78	1,70	1,98
80-85	1,79	1,97	1,65	1,82	1,55	1,73	1,55	1,73	1,54	1,75	1,50	1,68	1,70	1,91

Таблица 5

Значение коэффициента $R=LAR_{org}/LAR_{eff}$ для различных возрастных групп из популяций RF и EAA при компьютерной томографии абдоминального отдела у мужчин

Сканеры														
	A		B		C		D		E		F		G	
Популяция														
	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA
Дети и подростки, лет														
0-4	1,07	1,23	1,08	1,24	1,05	1,20	1,06	1,21	1,13	1,28	1,05	1,20	1,05	1,20
5-9	1,04	1,21	1,05	1,21	1,01	1,18	1,03	1,19	1,09	1,25	1,02	1,18	1,02	1,17
10-14	1,01	1,19	1,02	1,19	0,99	1,16	1,00	1,17	1,06	1,23	1,00	1,16	0,99	1,16
Взрослые, лет														
15-19	1,08	1,26	1,07	1,25	0,97	1,13	1,08	1,25	1,08	1,26	1,00	1,16	1,07	1,24
20-24	1,07	1,25	1,07	1,25	0,97	1,14	1,07	1,25	1,08	1,26	1,00	1,16	1,06	1,24
25-29	1,05	1,25	1,06	1,24	0,96	1,14	1,06	1,25	1,07	1,26	0,99	1,16	1,05	1,23
30-34	1,05	1,24	1,05	1,24	0,96	1,14	1,06	1,26	1,07	1,26	0,98	1,16	1,04	1,23
35-39	1,04	1,24	1,05	1,25	0,96	1,14	1,07	1,27	1,07	1,27	0,99	1,17	1,03	1,23
40-44	1,04	1,24	1,06	1,25	0,97	1,15	1,08	1,27	1,07	1,27	0,99	1,17	1,03	1,23
45-49	1,05	1,25	1,07	1,27	0,98	1,17	1,10	1,30	1,09	1,29	1,01	1,19	1,05	1,24
50-54	1,07	1,27	1,10	1,29	1,01	1,19	1,13	1,33	1,12	1,32	1,04	1,22	1,07	1,26
55-59	1,10	1,29	1,13	1,33	1,04	1,22	1,17	1,36	1,16	1,36	1,08	1,26	1,10	1,28
60-64	1,13	1,32	1,16	1,36	1,07	1,26	1,20	1,41	1,18	1,40	1,11	1,29	1,12	1,31
65-69	1,15	1,34	1,18	1,39	1,08	1,28	1,23	1,44	1,21	1,43	1,13	1,33	1,15	1,34
70-74	1,16	1,35	1,19	1,39	1,09	1,29	1,25	1,45	1,21	1,43	1,14	1,33	1,16	1,34
75-79	1,16	1,33	1,18	1,37	1,07	1,26	1,24	1,44	1,19	1,40	1,12	1,31	1,15	1,33
80-85	1,15	1,28	1,17	1,31	1,05	1,19	1,23	1,37	1,16	1,32	1,10	1,24	1,14	1,27

Таблица 6

Значение коэффициента $R=LAR_{org}/LAR_{eff}$ для различных возрастных групп из популяций RF и EAA при компьютерной томографии грудного отдела у женщин

Сканеры														
	A		B		C		D		E		F		G	
Популяция														
	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA
Дети и подростки, лет														
0-4	1,47	1,39	1,54	1,40	1,48	1,40	1,57	1,45	1,44	1,35	1,48	1,39	1,66	1,52
5-9	1,30	1,27	1,34	1,27	1,31	1,28	1,37	1,31	1,28	1,23	1,31	1,27	1,45	1,37
10-14	1,17	1,19	1,19	1,17	1,19	1,19	1,22	1,20	1,15	1,15	1,18	1,18	1,28	1,25
Взрослые, лет														
15-19	0,94	1,01	0,99	1,06	1,00	1,04	0,95	1,02	1,13	1,15	1,00	1,05	0,97	1,03
20-24	0,91	1,01	0,95	1,05	0,95	1,02	0,92	1,01	1,05	1,10	0,95	1,03	0,93	1,02
25-29	0,91	1,04	0,94	1,06	0,93	1,03	0,91	1,03	1,00	1,09	0,93	1,04	0,92	1,04
30-34	0,93	1,09	0,94	1,10	0,93	1,06	0,92	1,07	0,98	1,11	0,93	1,07	0,93	1,08
35-39	0,97	1,18	0,97	1,17	0,95	1,13	0,95	1,14	0,99	1,16	0,96	1,13	0,96	1,15
40-44	1,03	1,26	1,01	1,25	0,99	1,18	0,99	1,20	0,99	1,19	0,98	1,17	1,01	1,22
45-49	1,12	1,39	1,08	1,36	1,05	1,29	1,07	1,31	1,04	1,29	1,04	1,27	1,08	1,33
50-54	1,24	1,55	1,19	1,51	1,16	1,44	1,17	1,45	1,13	1,42	1,14	1,40	1,19	1,48
55-59	1,41	1,76	1,33	1,69	1,30	1,61	1,32	1,62	1,27	1,58	1,27	1,56	1,34	1,66
60-64	1,62	1,99	1,52	1,90	1,49	1,81	1,50	1,82	1,44	1,77	1,44	1,75	1,54	1,87
65-69	1,90	2,24	1,77	2,14	1,73	2,03	1,74	2,03	1,67	1,99	1,66	1,95	1,79	2,10
70-74	2,22	2,52	2,06	2,41	2,01	2,28	2,01	2,27	1,94	2,22	1,92	2,18	2,08	2,35
75-79	2,55	2,83	2,35	2,71	2,29	2,55	2,28	2,53	2,21	2,47	2,18	2,42	2,38	2,63
80-85	2,85	3,11	2,61	3,01	2,55	2,79	2,53	2,77	2,45	2,70	2,41	2,64	2,66	2,89

Таблица 7

Значение коэффициента $R=LAR_{org}/LAR_{eff}$ для различных возрастных групп из популяций RF и EAA при компьютерной томографии абдоминального отдела у женщин

Сканеры														
	A		B		C		D		E		F		G	
Популяция														
	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA	RF	EAA
Дети и подростки, лет														
0-4	0,72	0,76	0,71	0,76	0,76	0,81	0,81	0,86	0,76	0,80	0,81	0,85	0,87	0,92
5-9	0,70	0,76	0,70	0,75	0,73	0,79	0,78	0,83	0,73	0,79	0,78	0,83	0,83	0,89
10-14	0,68	0,75	0,68	0,74	0,72	0,79	0,75	0,82	0,72	0,78	0,75	0,82	0,80	0,86
Взрослые, лет														
15-19	0,67	0,73	0,75	0,81	0,77	0,84	0,75	0,81	0,80	0,86	0,81	0,88	0,74	0,80
20-24	0,66	0,72	0,73	0,80	0,75	0,83	0,73	0,80	0,77	0,85	0,79	0,86	0,72	0,79
25-29	0,66	0,73	0,72	0,80	0,74	0,83	0,72	0,80	0,76	0,84	0,77	0,86	0,71	0,79
30-34	0,66	0,74	0,72	0,81	0,74	0,84	0,72	0,81	0,76	0,85	0,77	0,86	0,71	0,79
35-39	0,67	0,76	0,73	0,83	0,75	0,86	0,73	0,83	0,76	0,87	0,77	0,88	0,71	0,81
40-44	0,69	0,79	0,74	0,84	0,76	0,87	0,74	0,85	0,77	0,88	0,78	0,89	0,73	0,83
45-49	0,72	0,82	0,76	0,87	0,78	0,90	0,76	0,89	0,79	0,92	0,80	0,93	0,75	0,86
50-54	0,75	0,86	0,79	0,91	0,82	0,95	0,80	0,93	0,83	0,97	0,84	0,98	0,79	0,90
55-59	0,80	0,91	0,84	0,97	0,87	1,01	0,85	0,99	0,88	1,03	0,89	1,04	0,84	0,96
60-64	0,86	0,97	0,90	1,04	0,94	1,09	0,92	1,06	0,95	1,11	0,96	1,12	0,90	1,02
65-69	0,94	1,05	0,99	1,11	1,03	1,17	1,02	1,15	1,05	1,19	1,06	1,21	0,99	1,10
70-74	1,04	1,13	1,09	1,20	1,15	1,27	1,13	1,25	1,17	1,30	1,18	1,31	1,09	1,19
75-79	1,15	1,22	1,21	1,30	1,27	1,38	1,25	1,35	1,29	1,40	1,30	1,41	1,21	1,29
80-85	1,25	1,31	1,31	1,39	1,37	1,47	1,36	1,45	1,40	1,50	1,41	1,51	1,32	1,39

В таблицах 8 и 9 приведены распределения пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах (на 10 тыс. человек) и в процентах от суммарного пожизненного риска по отдельным локализациям. Как видно из рисунков 3-6, максимальное значение LAR_{org} достигается для возрастной группы 0-4 года при компьютерной томографии грудного отдела детей и для возрастной группы 15-19 лет при компьютерной томографии абдоминального отдела. Именно для этих возрастных групп получены оценки пожизненного риска для отдельных органов и приведена зависимость коэффициента этиологической доли (ARF) по формуле (5) (рис. 7-10).

Таблица 8

Распределение пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах и в процентах от суммарного пожизненного риска для возрастной группы 0-4 года при облучении в результате процедуры компьютерной томографии грудного отдела детей (томограф A)

Орган или ткань	Доза, мГр	Популяция RF				Популяция EAA			
		Мужчины		Женщины		Мужчины		Женщины	
		Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10^{-4}							
		LAR	%	LAR	%	LAR	%	LAR	%
Щитовидная железа	7,9	0,262	8,71	2,820	25,84	0,367	7,38	2,263	17,60
Лёгкие	9,8	0,434	14,43	0,924	8,47	0,823	16,57	1,638	12,74
Пищевод	9,5	0,108	3,60	0,053	0,49	0,214	4,31	0,150	1,17
Печень	8,1	0,368	12,25	0,211	1,93	0,830	16,71	0,391	3,04
Желудок	2,7	0,244	8,10	0,479	4,39	0,445	8,97	0,642	4,99
Толстый кишечник	0,4	0,038	1,25	0,023	0,21	0,087	1,75	0,040	0,31
Мочевой пузырь	0,1	0,004	0,13	0,004	0,04	0,010	0,20	0,008	0,07
Красный костный мозг	2,8	0,292	9,72	0,134	1,23	0,295	5,94	0,133	1,03
Яичники	0,1	-	-	0,005	0,04	-	-	0,006	0,04
Молочная железа	8,5	-	-	4,941	45,28	-	-	6,173	48,01
Остальные	4,0[а] (3,5[б])	1,258	41,82	1,318	12,08	1,895	38,16	1,414	11,00
Все ЗНО		3,008	100	10,912	100	4,966	100	12,859	100

[а] – доза облучения у мужчин; [б] – доза облучения у женщин.

Таблица 9

Распределение пожизненного риска для отдельных органов и тканей в абсолютных величинах и в процентах от суммарного пожизненного риска для возрастной группы 15-19 лет при облучении в результате процедуры компьютерной томографии абдоминального отдела взрослых (томограф Е)

Орган или ткань	Доза, мГр	Популяция RF				Популяция EAA			
		Мужчины		Женщины		Мужчины		Женщины	
		Пожизненный риск (LAR) заболеваемости раком, 10^{-4}							
		LAR	%	LAR	%	LAR	%	LAR	%
Щитовидная железа	0,3	0,003	0,06	0,030	0,41	0,004	0,05	0,023	0,24
Лёгкие	5,2	0,255	5,88	0,520	7,05	0,470	5,98	0,934	9,51
Пищевод	5,6	0,053	1,21	0,033	0,44	0,103	1,31	0,078	0,80
Печень	10,5	0,313	7,20	0,182	2,47	0,732	9,31	0,350	3,56
Желудок	11,6	0,710	16,34	1,379	18,70	1,308	16,64	1,837	18,71
Толстый кишечник	11,7	0,759	17,46	0,460	6,24	1,799	22,89	0,810	8,25
Мочевой пузырь	10,3	0,323	7,45	0,341	4,62	0,773	9,83	0,676	6,89
Красный костный мозг	5,4	0,557	12,83	0,254	3,44	0,568	7,23	0,259	2,64
Яичники	11,5	-	-	0,377	5,11	-	-	0,431	4,39
Молочная железа	7,2	-	-	2,000	27,13	-	-	2,472	25,17
Остальные	8,2[а] (8,4[б])	1,371	31,56	1,798	24,39	2,104	26,76	1,949	19,85
Все ЗНО		4,344	100	7,373	100	7,861	100	9,819	100

[а] – доза облучения у мужчин; [б] – доза облучения у женщин.

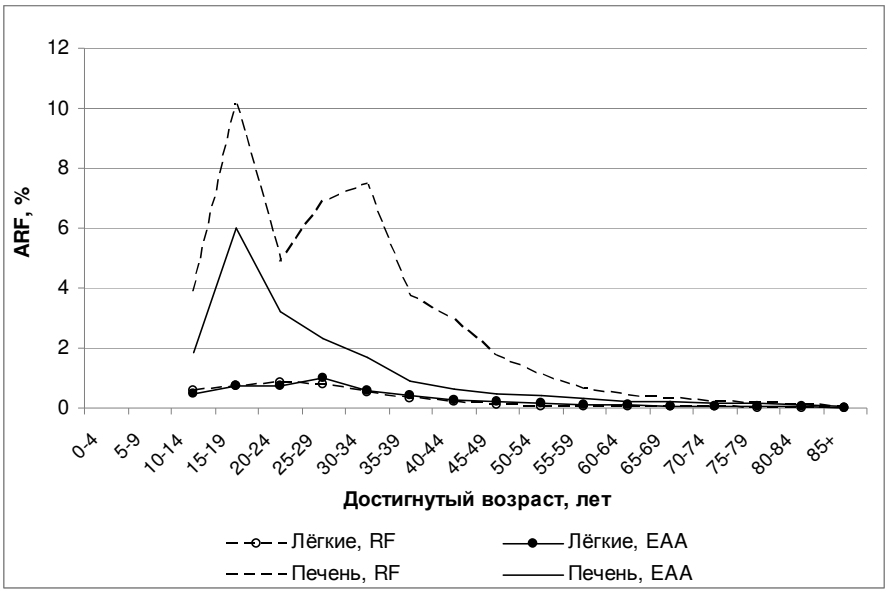

Рис. 7. Зависимость коэффициента этиологической доли заболеваемости раком лёгких и печени от достигнутого возраста после облучения грудного отдела мальчиков в возрасте 0-4 года (томограф А).

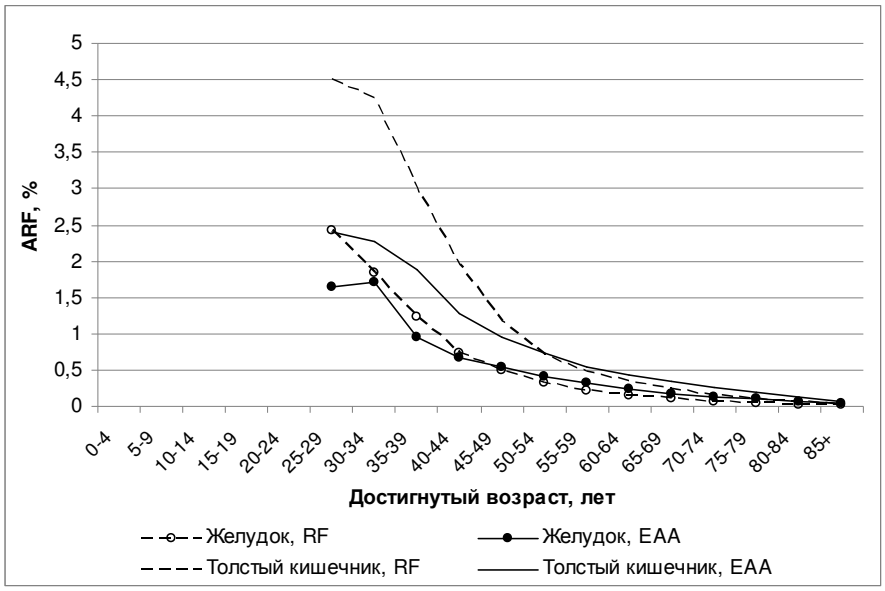

Рис. 8. Зависимость коэффициента этиологической доли заболеваемости раком желудка и толстого кишечника от достигнутого возраста после облучения абдоминального отдела мужчин в возрасте 15-19 лет (томограф Е).

Рис. 9. Зависимость коэффициента этиологической доли заболеваемости раком молочной и щетовидной желёз от достигнутого возраста после облучения грудного отдела девочек в возрасте 0-4 года (томограф А).

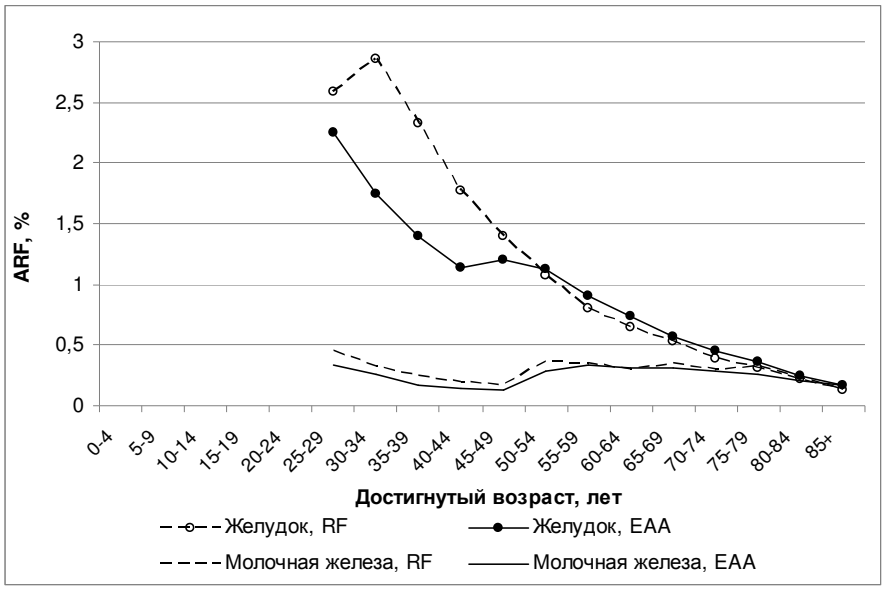

Рис. 10. Зависимость коэффициента этиологической доли заболеваемости раком желудка и молочной железы от достигнутого возраста после облучения абдоминального отдела женщин в возрасте 15-19 лет (томограф E).

Результаты и их обсуждение

В настоящее время достаточно широкое распространение получили технологии оценки неблагоприятных последствий медицинского облучения с использованием величины эффективной дозы. Имеются уже интерактивные компьютерные программы, реализующие эту технологию [7]. Вместе с тем, принятые недавно международные рекомендации и стандарты не рекомендуют проводить оценку радиационных рисков на основе эффективных доз [14].

Поэтому основной целью представленной работы была оценка величины $\boldsymbol{R=LAR_{org}/LAR_{eff}}$, которая напрямую даёт численное представление об ошибках в оценке пожизненного атрибутивного риска, когда для этих целей используются эффективные, а не органные дозы. Расчёты были проведены для нескольких типов КТ-сканеров, для которых имелись оценки органных и эффективных доз.

Итоговые результаты работы представлены в таблицах 4-9 и на рисунках 3-10. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Как видно из таблицы 6 (сканер A, популяция EAA, грудной отдел, возрастная группа 80-85 лет, женщины), величина ***R*** может превышать значение 3. С другой стороны, как видно из таблицы 7 (сканер A, популяция EAA, абдоминальный отдел, возрастная группа 20-24 года, женщины), величина ***R***=0,72, т.е. меньше единицы. В первом случае использование эффективной дозы занижает пожизненный атрибутивный риск более чем в 3 раза, во втором – завышает примерно на 30 %. Понятно, что полученные оценки говорят о серьёзном искажении в определении ***LAR***, когда используется эффективная, а не органная доза.

2. Сравнение величины ***R*** для когорт RF и EAA показывает, что искажение в оценке пожизненного риска на основе эффективных доз более выражено для популяции EAA – усреднённой европейско-американской и азиатской популяции. Это определяется тем, что вероятность здорового дожития в популяции EAA выше, чем в популяции RF.

3. Как видно из таблиц 4-7, величина $\boldsymbol{R=LAR_{org}/LAR_{eff}}$ выше у женщин, чем у мужчин. Это может быть обусловлено тем, что радиационный риск на единицу дозы у женщин выше, чем у мужчин.

4. Величины ***R*** при компьютерной томографии грудного и абдоминального отделов существенно отличаются. Как, например, видно из таблиц 6, 7 (популяция EAA), при компьютерной томографии грудного отдела $\boldsymbol{R}>1$ (т.е. эффективная доза занижает риск), а при компьютерной томографии абдоминального отдела для большинства возрастных групп $\boldsymbol{R}<1$ (т.е. эффективная доза завышает риск).

5. Анализ распределения пожизненных рисков (табл. 7, 8) по отдельным органам и тканям показал, что наибольший вклад в суммарный пожизненный риск при исследовании грудного отдела вносят:

а) для мужчин – лёгкие и печень (14,4 и 12,3 % соответственно);

б) для женщин – молочная железа и щитовидная железа (48,0 и 17,6 % соответственно);

при исследовании абдоминального отдела:

а) для мужчин – желудок и толстый кишечник (16,3 и 17,5 % соответственно);

б) для женщин – молочная железа и желудок (25,2 и 17,6 % соответственно).

Полученные оценки имеют важное значение для оптимизации технологий профилактической помощи после проведения компьютерной томографии.

6. Максимальное значение этиологической доли (ARF, %) для рассмотренных классов злокачественных новообразований достигается сразу же после завершения латентного периода возможной индукции радиогенных раков, что имеет важное практическое значение при планировании технологий ранней диагностики возможных онкологических заболеваний.

7. Полученные в работе результаты подтверждают правильность основного вывода МКРЗ о том, что эффективную дозу не следует использовать для оценки радиационных рисков стохастических онкологических эффектов [14].

Литература

1. Злокачественные новообразования в России в 2008 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. В.И. Чиссова, В.В. Старинского. Г.В. Петровой. М., 2010.
2. **Иванов В.К., Меняйло А.Н., Кащеев В.В. и др.** Сравнительный анализ современных моделей оценки радиационных рисков МКРЗ и НКДАР ООН //АНРИ. 2011. № 3 (66). С. 18-29.
3. **Иванов В.К., Цыб А.Ф., Метлер Ф.А. и др.** Радиационные риски медицинского облучения //Радиация и риск. 2011. Т. 20, № 2. С. 17-28.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
5. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила, СП 2.6.1.2612-10. М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации Минздрава России, 2010.
6. **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 //The British Journal of Radiology. 2007. V. 80. P. 657-667.
7. http://www.xrayrisk.com.
8. IAEA Safety Standards. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements, No. GSR, Part 3 (Interim). Vienna: IAEA, 2011.
9. **Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu. et al.** Radiation-epidemiological studies of thyroid cancer incidence in Russia after the Chernobyl accident (estimation of radiation risks, 1991-2008 follow-up period) //Radiat. Prot. Dosimetry. 2012. V. 151, N 3. P. 489-499.
10. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Khait S.E. et al.** Leukemia incidence in the Russian cohort of Chernobyl emergency workers //Radiat. Environ. Biophys. 2012. V. 51, N 2. P. 143-149.
11. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Mettler F.A. et al.** Methodology for estimating cancer risks of diagnostic medical exposure: with an example of the risks associated with computed tomography //Health Phys. 2012. V. 103, N 6. P. 732-739.
12. National Academy of Sciences Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR). Report VII. Health effects of exposure to low levels of ionizing radiations: time for reassessment. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2005.
13. **Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S. et al.** Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 //Radiat. Res. 2007. V. 168. P. 1-64.
14. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105 //Annals of the ICRP. 2007. V. 37, N 8. Elsevier, 2007. 63 p.
15. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Annals of the ICRP. 2007. V. 37, N 2-4. Elsevier, 2007. 332 p.

Assessment of radiation risk associated with medical exposure in terms of effective and organ doses

Ivanov V.K., Kashcheev V.V., Chekin S.Yu., Menyaylo A.N., Pryakhin E.A., Tsyb A.F., Mettler F.A.[1]

Medical Radiological Research Center of the Russian Ministry of Health, Obninsk;
[1] Department of Radiology and Nuclear Medicine Service,
New Mexico VA Health Care Services, USA

The authors compare values of radiation risks of potential cancer from diagnostic radiation exposure assessed with the use of organ and effective doses. Estimates of lifetime attributable risk from CT scanning made with ICRP 103 risk models and national data of medical statistics are given as an example. It is shown that values of lifetime attributable risk based on organ and effective doses can differ 3.11 times. Values of lifetime attributable cancer risk for specific organs are presented as well.

Key words: *radiation risks, computed tomography, organ and effective doses, lifetime attributable risk*.

Ivanov V.K.* – Chairman of RSCRP, Deputy Director, Corresponding Member of RAMS; **Kashcheev V.V.** – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; **Chekin S.Yu.** – Senior Researcher; **Menyaylo A.N.** – Postgraduate Student; **Pryakhin E.A.** – Postgraduate Student; **Tsyb A.F.** – Director, Academician of RAMS. MRRC. **Mettler F.A.** – MD, Department of Radiology and Nuclear Medicine Service, New Mexico VA Health Care Services, USA.
*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (48439) 9-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.