ФЕДЕРАЛЬНОЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Медицина экстремальных ситуаций

Medicine of Extreme Situations

Научно-практический журнал

2013, № 3 (45)

Главный редактор
В.В. Уйба

Журнал основан в 1999 году

Москва 2013

Содержание

Колонка главного редактора 5

1. Организация и совершенствование медицинского обеспечения и государственного санитарно-эпидемиологического надзора. Предупреждение и ликвидация последствий чрезвычайных ситуаций

Б.Н. Филатов, Н.Г. Британов, В.В. Клаучек, Н.В. Крылова, Л.А. Доброшенко
Некоторые аспекты обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения при ликвидации опасных химических объектов 6

А.Р. Туков, Г.И. Гнеушева, Ю.В. Суворова, В.А. Дикарев
Заболеваемость неонкологическими болезнями лиц, подвергающихся профессиональному радиационному воздействию 14

А.Б. Тривоженко, В.А. Воробьев, А.А. Кострикин
Диагностические возможности многосуточной сфокусированной регистрации эпизодов ЭКГ системой ЭЛСКАН 22

Н.П.Истомин, Ю.В. Иванов, В.В. Иванов
Опыт применения надропарина кальция (фраксипарина) для профилактики венозных тромбоэмболических осложнений у хирургических больных 30

В.Д. Остапишин, А.А. Лубяко, Д.В. Башлыков, А.Н. Башлыкова, Ч.С. Борисевич, Д.Н. Волков, С.В. Медников, С.В. Светличная, А.С. Тямбина
Оценка и эффективность индивидуальных биомедицинских и психофизиологических технологий в спорте наивысших достижений 36

2. Результаты научно-исследовательских работ в области изучения влияния на организм человека особо опасных и вредных производственных факторов

А.Т. Губин
К оценке радиогенных рисков для протяженного облучения на основе моделей риска для острого облучения 46

В.Е. Жуков, И.П. Скалич, И.Г. Фролова
Кожно-резорбтивное действие нитроглицерина в моделируемых условиях применения 57

А.В. Чечеткин, А.Б. Макеев, В.Е. Солдатенков, М.Ш. Григорьян
Совершенствование технологий заготовки эритроцитных компонентов в службе крови Российской Федерации 63

А.Н. Худяков, О.О. Зайцева, Т.В. Полежаева, Д.С. Лаптев, А.А. Костяев
Оценка интенсивности перекисного окисления липидов ядросодержащих клеток крови под влиянием компонентов криоконсервантов хемилюминесцентным методом 70

3. Информация

Решение расширенного заседания коллегии Федерального медико-биологического агентства от 23 июля 2013 г. «Итоги работы ФМБА России в 2012 году и задачи на 2013–2014 гг. 74

Особенности и нововведения нового закона о донорстве крови 79

Справка по медицинскому обеспечению XXVII Всемирной летней Универсиады в г. Казани (6–17 июля 2013 г.) 81

Synergasia Cooperativa sociale On-lus 84

Требования к оформлению материалов, предоставляемых для публикации в журнале «Медицина экстремальных ситуаций» 86

А.Т. Губин

К оценке радиогенных рисков для протяженного облучения на основе моделей риска для острого облучения

ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены ФМБА России», г. Москва

A.T. Gubin

Extended exposure and radiogenic risks assessment in acute exposure risk models

Federal State Unitary Enterprise Research and Technical Center of Radiation-Chemical Safety and Hygiene, Moscow

Ключевые слова: *ионизирующее излучение, хроническое облучение, оценка риска, радиогенные риски, модели риска.*

Keywords: *ionizing radiation, chronic exposure, risk assessment, radiogenic risks, risk models.*

Предложена методика расчета радиогенных рисков для протяженных облучений на основе моделей риска, разработанных для острого облучения. В методике учтено, что в процессе длительного облучения последующие порции дозы воздействуют на организм, измененный дозами предшествующего облучения, вследствие чего при расчете по модели относительного риска вкладов в риск от доз, сообщаемых в разных возрастах, используется модифицированная зависимость фоновой смертности от возраста. На примере модели относительного риска Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) для мужчин продемонстрирована возможность существенного влияния модификации фоновой смертности на оценки риска при реализующихся на практике режимах облучения.

Цель исследования *– разработка методики расчета радиогенного риска для условий протяженного или фракционированного облучения на основе моделей относительного риска, выведенных для острого облучения.*

Материалы и методы*. Для обоснования методики использованы формальные математические методы, включая метод последовательных приближений. Оценки возможного вклада эффекта модификации фоновой смертности в радиогенный риск для протяженного облучения получены*

The proposed methodology is based on the acute irradiation risk models and is applicable for radiogenic risks estimation in cases of chronic irradiation exposure. This methodology takes into account that following doses exposure effects previously already effected organism. Our model considers these building up dosages and age and is based on modified correlation. Using existing relative risk model, suggested by the International Commission on Radiological Protection (ICPR) in Publication 103 for men, it was shown, that commonly used methods of radiogenic risks estimation for chronic exposures based on summation of different doses contributions to the risks with assumption of their independence may lead to significant underestimation of risks. It was shown the possibility of situations, where chronic exposure may be more effective than acute one.

Purpose *– using existing relative risk estimation models, designed for acute irradiation, to develop a radiogenic risk assessment methodology for chronic irradiation or fractionated irradiation exposure.*

Materials and methods*. The formal mathematical methods, including the method of successive approximations, were used for validation of the methodology. Assessments for the possible contribution of the background mortality modification effect in the radiogenic risk for extended exposure were obtained*

на основе модели относительного риска для мужчин из Рекомендаций МКРЗ 2007 г.
Результаты. *Продемонстрировано, что обычно применяемые методы расчета радиогенного риска для протяженных облучений, основанные на суммировании вкладов в риск от разных доз в предположении их независимости, при мощностях дозы, характерных для облучения персонала и населения в аварийных условиях, могут приводить к существенному занижению оценок риска. Показана возможность ситуаций облучения, когда хроническое облучение оказывается эффективнее острого.*
Выводы. *Эффект модификации фоновой смертности дозами предшествующего облучения может быть причиной неожиданно высоких оценок риска рака, систематически получаемых в эпидемиологических исследованиях на группах населения, подвергшихся техногенному облучению. В свете полученных результатов введение коэффициента эффективности дозы и мощности дозы в современную систему радиационной защиты, а также выбор значения 2 для этого коэффициента требуют дополнительного рассмотрения.*

on the basis of the relative risk model for men taken from the ICRP Publication 103.
Results. *It was demonstrated that commonly used methods of estimating radiogenic risks for extended exposures based on summation of different doses contributs to the risks with assumption of their independence and at dose rates typical for personnel and population exposed in emergency situations, may lead to significant underestimation of risks. The possibility of situations was shown, where chronic exposure may be more effective than acute one.*
Conclusions. Background mortality modification effect by previous exposure doses may cause unexpectedly high estimated cancer risks systematically obtained in epidemiological studies on population groups exposed to technogenic irradiation. In the light of the obtained results, introduction of efficiency factor for both dose and dose rate in the modern radiation protection system, as well as assignment the value of 2 for this coefficient require further consideration.

В настоящее время радиационная эпидемиология располагает обширными массивами данных, позволяющими с приемлемой точностью получать оценки радиогенного риска для ситуаций острого облучения при дозах порядка 100 мЗв и выше. Наиболее известными и надежными из них являются результаты многолетних систематических наблюдений за когортой лиц, выживших после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки (когорта LSS) [15]. Данные о смертности и заболеваемости в когорте LSS, накопленные к концу прошлого столетия, проанализированы с применением современных статистических методов и уточненной дозиметрической системы DS02 [12–14]. Результаты анализов подробно рассмотрены в Докладе Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) 2006 г. [16] и положены в основу разработки Рекомендаций Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) 2007 г. [7]. Аналитические выражения и данные, представленные в этих публикациях, позволяют рассчитывать радиологические риски для ситуаций однократного острого облучения в заданной дозе с учетом пола, возраста при облучении и достигнутого возраста.

Хуже обстоят дела с оценками радиогенных рисков для ситуаций протяженного (хронического) облучения при низких мощностях дозы, наиболее интересных для практики радиационной гигиены и безопасности. Основным источником эпидемиологической информации в этом случае служат наблюдения за заболеваемостью и смертностью среди лиц, подвергшихся профессиональному облучению [9] и облучению вследствие проживания на территориях, загрязненных радиоактивными веществами [1; 5; 8]. К сожалению, накопленные данные для этих контингентов до сих пор не столь надежны, как для когорты LSS. Результаты анализов этих данных подвергаются сомнениям [16], и пока не удалось получить аналитические соотношения для расчета радиогенных рисков для различных ситуаций протяженного облучения, подобные соотношениям для острого облучения.

В связи с этим представляет интерес разработка адекватного метода определения радиогенных рисков, обусловленных хроническим облучением, исходя из имеющихся моделей относительного риска для острого облучения. В основу существующих подходов к решению этой задачи положено предположение о независимости рисков, обуслов-

ленных облучениями в разные возрастные интервалы, что позволяет рассчитывать общий риск путем простого суммирования рисков. Этим предположением руководствовалась и МКРЗ при разработке своих рекомендаций. Формально метод суммирования рисков, связанных с профессиональным облучением, обрел правомерность после опубликования в 1996 г. технического документа МАГАТЭ [11]. Позднее он стал использоваться и в ряде российских методических документов по оценке вреда от хронического облучения для населения и персонала, рекомендованных для широкого применения [см., например, 2–4; 6].

Однако в целом предположение о независимости рисков неправомерно, поскольку очевидно, что в процессе многократного (или хронического) облучения последующие порции дозы воздействуют на организм, измененный накопленной дозой предшествующего облучения и, следовательно, характеризующийся измененной чувствительностью к последующим дозам излучения. Понятно, что при достаточно малых мощностях дозы (накопленных дозах) таким изменением радиочувствительности можно пренебречь, и применение указанных методик вполне правомерно. Однако количественные критерии для установления границ применимости гипотезы независимых рисков отсутствуют.

В данной работе предложен метод расчета радиогенных рисков для ситуаций протяженного облучения на основе моделей риска для острого облучения, в котором учитывается влияние дозы, накопленной в предшествующий период облучения, на эффективность облучения в последующий период. На конкретных примерах проиллюстрировано отличие результатов расчетов по предлагаемому методу от результатов метода независимых рисков. Сформулирован количественный критерий применимости методик оценки рисков для протяженных облучений, основанных на предположении о независимости рисков.

Метод расчета радиационного компонента интенсивности смертности для протяженного облучения

Для расчета любого из обычно используемых в настоящее время показателей радиогенного риска необходимо знать дополнительную интенсивность смертности (ИС) от рака (или какого-либо типа рака), обусловленную облучением. Для определенности при изложении метода зависимых рисков будем рассматривать радиационное приращение ИС от всех солидных раков (СР) вместе взятых. Результаты анализа имеющихся данных о смертности и заболеваемости после однократных радиационных воздействий показывают, что для СР оптимальна мультипликативная модель – модель относительного риска. Полагают, что эта модель инвариантна относительно населения [16], т.е., будучи определенной для какой-либо одной группы населения, она может применяться и ко всем другим группам.

Обозначим фоновую (без облучения) ИС от СР и радиационное приращение ИС от СР вследствие однократного (острого) облучения символами μ_c и $\Delta\mu_{cr}$ соответственно. Подстрочные индексы «*c*» и «*cr*» здесь и далее означают, что помеченные ими величины характеризуют соответственно фоновую ИС от СР и смертность после облучения. Величины, относящиеся к протяженному облучению, будем помечать крышечками (например, радиационное приращение ИС от СР, обусловленное хроническим облучением, всюду обозначается как $\Delta\widehat{\mu}_{cr}$).

Пусть известна зависимость относительного риска на единицу дозы $\varepsilon_{cr}(t_0,t)$ после однократного облучения в возрасте t_0 от достигнутого возраста t, надежно выведенная их результатов наблюдений за какой-либо когортой. Пусть известна также зависимость фоновой ИС от СР $\mu_{\tilde{n}}(t)$ для когорты, риск от протяженного облучения для которой предстоит определить. Тогда согласно модели относительного риска абсолютное приращение ИС от СР при дозе D острого облучения для интересующей когорты можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\mu_{\tilde{n}r}(t_0,t) = \mu_{\tilde{n}r}(t_0,t) - \mu_{\tilde{n}}(t) = D\cdot\mu_{\tilde{n}}(t)\cdot\varepsilon_{cr}(t_0,t). \quad (1)$$

Задача состоит в том, чтобы, основываясь на этом соотношении, получить оценку абсолютного приращения ИС на единицу дозы, $\Delta\widehat{\mu}_{\tilde{n}r}(t_0,t)$, для протяженного облучения с заданным режимом изменения мощности дозы.

Обычно при решении этой задачи прибегают к простому суммированию вкладов в ИС от элементарных порций дозы, приходящихся на разные возрастные периоды с момента начала облучения до интересующего возраста. При этом величины вкладов, соответствующих таким элементарным порциям дозы, рассчитываются как для малых доз однократного облучения. Таким образом, если известно изменение мощности дозы с возрастом, $P(t)$, то расчет абсолютного приращения ИС от СР, $\Delta\hat{\mu}_{cr}(t_0,t)$, для возрастов $t > t_0$ при таком подходе сводится к вычислению интеграла:

$$\Delta\hat{\mu}_{cr}(t_0,t) = \hat{\mu}_{cr}(t_0,t) - \mu_c(t) = \mu_c(t)\cdot\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'. \quad (2)$$

Недостаток метода состоит в том, что, как и в случае острого облучения, когда излучение воздействует на интактный организм, для расчета приращений ИС от элементарных порций дозы применяются фоновые (т.е. наблюдающиеся без облучения) ИС. Однако с позиций современных представлений о спонтанном канцерогенезе ионизирующее излучение техногенных источников на людей при не слишком больших мощностях дозы ничем не отличается от других канцерогенных факторов среды обитания, в состав которых помимо прочего входит природное ионизирующее излучение. Соответственно при расчетах приращения ИС от СР, обусловленного протяженным облучением, на основе моделей относительного риска для острого облучения следует учитывать модификацию фоновой ИС от СР предшествующим облучением, т.е. вместо истинной фоновой зависимости $\mu_c(t)$ следует использовать некоторую модифицированную – $\hat{\mu}_{cm}(t_0,t)$.

Формально для определения $\hat{\mu}_{cm}(t_0,t)$ можно записать следующее уравнение:

$$\hat{\mu}_{cm}(t_0,t) = \mu_c(t) + \hat{\mu}_{cm}(t_0,t)\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt', \quad (3)$$

в котором второе слагаемое в правой части является радиационной добавкой к фоновой ИС от СР, обусловленной облучением в течение возрастного периода, предшествующего возрасту t. Отсюда приходим к соотношению:

$$\hat{\mu}_{cm}(t_0,t) = \frac{\mu_c(t)}{1-\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'}, \quad (4)$$

справедливому при условии $\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt' < 1$.

Следует заметить, что формулу (4) можно вывести также, воспользовавшись методом последовательных приближений (см. Приложение).

Замена $\mu_c(t)$ перед интегралом в формуле (2) на полученное $\hat{\mu}_{cm}(t_0,t)$ дает искомое выражение для абсолютного приращения ИС, обусловленного протяженным облучением с изменяющейся по закону $P(t)$ мощностью дозы в течение возрастного периода $[t_0,t]$:

$$\Delta\hat{\mu}_{cr}(t_0,t) = \mu_c(t)\times\frac{\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'}{1-\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'}. \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что при малых мощностях дозы, когда интегралом в знаменателе по сравнению с единицей можно пренебречь, формула (5) преобразуется в формулу (2), и если к тому же режим облучения таков, что можно принять $P(t) = D\cdot\delta(t-t_0)$, где $\delta(t-t_0)$ – дельта-функция, то из формулы (5) следует формула (1) для острого облучения.

Очевидно, что критерий применимости общепринятого метода расчета радиационного приращения ИС от СР при протяженном облучении путем суммировании абсолютных рисков от элементарных доз можно записать в виде:

$$\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt' < \xi, \quad (6)$$

где ξ – параметр, значение которого выбирается исходя из требований к точности результата расчета. Для задач радиационной безопасности эти требования заведомо выполняются при любом значении ξ порядка 0,1 и менее.

Отметим, что условие (6) применимо в той степени, в какой применим сам подход к оценке риска для хронического облучения на основе модели относительного риска для острого облучения. В его основе лежит пред-

положение о линейности кривых доза – эффект для всех доз, реализующихся при выбранной зависимости $P(t)$.

Вклад эффекта модификации фона предшествующим облучением (далее – ЭМФ) удобно характеризовать величиной отношения обусловленной ЭМФ добавки в радиационное приращение ИС к радиационному приращению ИС, рассчитанному согласно методу простого суммирования рисков:

$$\Delta(t_0,t)=\frac{\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'}{1-\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'}. \quad (7)$$

При решении задач радиационной безопасности, таких как определение коэффициента эффективности дозы и мощности дозы – DDREF, представляет интерес не столько само по себе радиационное приращение ИС, сколько радиогенный риск для какой-либо группы населения. При низких дозах радиогенный риск обычно выражается через функцию риска, равную интегралу от приращения ИС за период облучения, поэтому в следующем разделе для сопоставления эффективностей острого и хронического облучений используется соотношение соответствующих им функций риска на единицу дозы:

$$\omega(t_0,t)=\frac{\int_{t_0}^{t}\Delta\mu_{cr}(t_0,t')dt' \Big/ D}{\int_{t_0}^{t}\Delta\hat{\mu}_{cr}(t_0,t')dt' \Big/ \int_{t_0}^{t}P(t')dt'}, \quad (8)$$

где $\Delta\mu_{cr}(t_0,t)$ и $\Delta\hat{\mu}_{cr}(t_0,t)$ определяются формулами (1) и (5).

Как отмечено ранее, модель относительного риска $\varepsilon_{cr}(t_0,t)$ инвариантна относительно населения, поэтому и критерий (6) в равной мере применим для всех групп населения, т.е. если, например, по мощности дозы для населения какой-либо страны критерий соблюдается, то соблюдается он и для населений всех других стран. Некоторая поправка может потребоваться при наличии существенных различий по половому составу, поскольку имеющиеся эпидемиологические данные показывают, что $\varepsilon_{cr}(t_0,t)$ для мужчин и женщин не одинаковы.

Далее представлены расчеты, иллюстрирующие на конкретном примере величину возможного вклада ЭМФ в радиационное приращение риска при хроническом облучении.

Пример и некоторые результаты применения метода

Рассмотрим гипотетическую ситуацию, при которой мужская часть когорты LSS вместо острого облучения при атомных бомбардировках 1945 г. подверглась бы непрерывному облучению в течение всего последующего периода при постоянной мощности дозы. Воспользуемся моделями абсолютного и относительного риска для мужчин из Рекомендаций МКРЗ 2007 г. [7]. В явном виде эти модели, представленные далее формулами (9) и (10), в Рекомендациях не приводятся, однако они однозначно определяется данными табл. А.4.6 и А.4.7 Приложения А Рекомендаций. Этим моделям соответствует фоновая зависимость ИС от СР для мужчин, определяемая формулой (11).

$$\Delta\mu_{cr}(t_0,t)=1{,}32\cdot10^{-9}\cdot e^{-0{,}0274\cdot t_0}\cdot t^{3{,}63}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cr}(t_0,t)=24{,}7\cdot \mathrm{e}^{-0{,}0371\cdot t_0}\cdot t^{-0{,}74}; \quad (10)$$

$$\mu_c(t_0,t)=\frac{\Delta\mu_{cr}(t_0,t)}{\varepsilon_{cr}(t_0,t)}=5{,}34\cdot10^{-11}\cdot e^{0{,}0096\cdot t_0}\cdot t^{4{,}37}. \quad (11)$$

Здесь и во всех приводимых далее формулах числовые коэффициенты соответствуют случаю, когда оба возраста выражены в годах, а доза и мощность дозы – в Зв и Зв/год.

Заметим, что зависимость фоновой ИС от СР от возраста при облучении, присутствующая в формуле (11), на самом деле является зависимостью от календарного периода рождения и отражает влияние постепенного изменения условий жизни на фоновую смертность от рака для различных поколений мужчин когорты. В отличие от этого зависимость относительного и абсолютного риска от возраста при облучении характеризует как возрастные различия в «канцерогенной» радиочувствительности, так и исторические тенденции в условиях жизни.

Рассмотрим ситуацию непрерывного облучения гипотетической когорты мужчин при постоянной мощности дозы P в течение

всей жизни, начиная с возраста t_0. В этом случае с учетом длительности латентного периода L условие (6) применимости предлагаемого метода можно записать в виде:

$$P(t) < 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot \xi \cdot \frac{t^{0,74}}{e^{-0,0371 \cdot t_0} - e^{-0,0371 \cdot t}}. \quad (12)$$

На графиках рис. 1 приведены зависимости процентного вклада ЭМФ в радиационное приращение ИС от достигнутого возраста для пяти возрастов начала облучения (0, 5, 10 и 20 лет) при значениях мощности дозы 0,002; 0,005; 0,01 и 0,02 мЗв/год. Кривые на графиках расположены сверху вниз в порядке увеличения перечисленных значений мощности дозы. В таблице приведены максимальные значения процентного вклада ЭМФ для различных возрастов начала облучения и мощностей дозы.

Графики рис. 1 и данные таблицы 1 показывают, что для всех рассмотренных мощностей дозы вклад ЭМФ максимален, когда хроническое облучение начинается с момента рождения, и довольно быстро спадает по мере увеличения возраста начала облучения. Этот вклад может быть заметным даже при очень низких значениях мощности дозы. Например, в случае облучения в течение всей жизни при мощности дозы 0,002 мЗв/год, которая только вдвое превышает предел, установленный для облучения населения от техногенных источников, максимальный вклад ЭМФ достигает 8,3%. С ростом мощности дозы он быстро увеличивается и при пределе годовой дозы для профессионального облучения составляет уже более 328%. По мере увеличения возраста начала облучения вклад ЭМФ убывает и для случая облучения с 40 лет при 0,02 мЗв/год в максимуме составляет примерно 10%.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что при мощностях дозы, которые вполне могут реализовываться на практике, расчеты на основе гипотезы независимости рисков, т.е. путем простого суммирования вкладов, связанных с элементарными

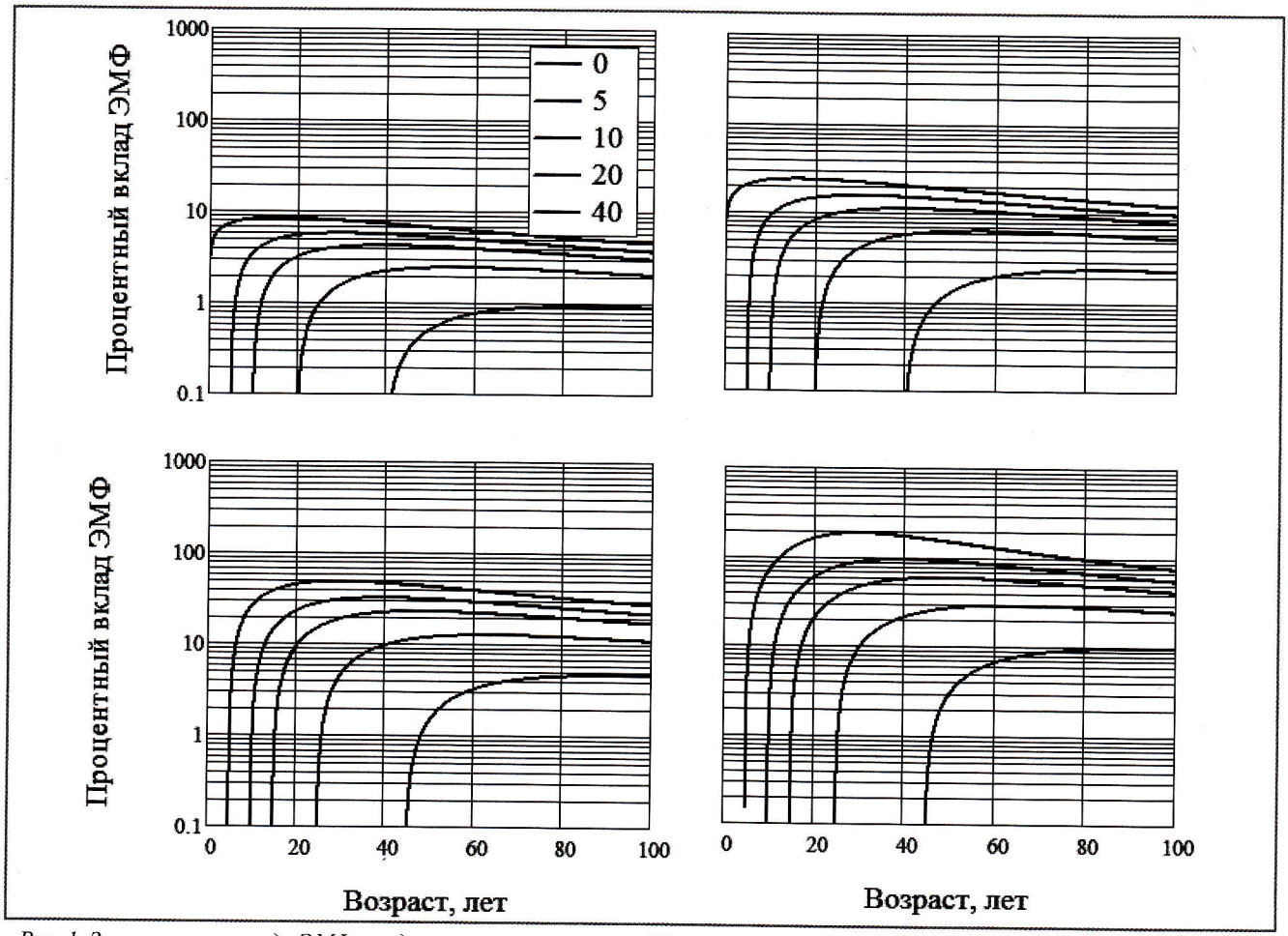

Рис. 1. Зависимость вклада ЭМФ в радиационное приращение ИС, рассчитанного по формуле (7), в процентах от достигнутого возраста при указанных на вкладке верхнего левого графика возрастах начала хронического облучения для мощностей дозы 0,002 мЗв/год (вверху слева), 0,005 мЗв/год (вверху справа), 0,01 мЗв/год (внизу слева) и 0,02 мЗв/год (внизу справа)

Максимумы процентного вклада ЭМФ в радиационное приращение ИС от СР в зависимости от мощности дозы и возраста начала облучения					
Возраст начала облучения, лет	Мощность дозы, Зв/год				
	0,002	0,005	0,010	0,020	0,025
0	8,30	23,7	62,1	328	2263
3	6,54	18,1	44,3	159	330
5	5,70	15,6	37,0	117	207
10	4,19	11,2	25,2	67,4	101
20	2,43	6,32	13,5	31,2	42,3
40	0,924	2,34	4,80	10,1	12,9

фракциями дозы, будут приводить к существенному занижению прогнозируемого вреда для здоровья персонала и населения.

На рис. 2 показана зависимость соотношения функций риска для острого и хронического облучения от достигнутого возраста, рассчитанная по формуле (8) для возрастов начала хронического облучения (совпадающих с возрастами острого облучения) 0, 5, 10 и 20 лет. Пунктиром показаны результаты расчетов общепринятым методом, а сплошными линиями (в порядке расположения значений мощности дозы на вкладке верхнего графика) – по предлагаемому методу. Рисунок выявляет наличие обширной области мощностей дозы (начиная примерно с 0,01 мЗв/год), возрастов начала облучения и достигнутых возрастов, в которой хроническое облучение оказывается эффективнее однократного. В отличие от этого обычный метод, результаты которого не зависят от мощности дозы, для всех достигнутых возрастов приводит к более высокой эффективности однократного облучения.

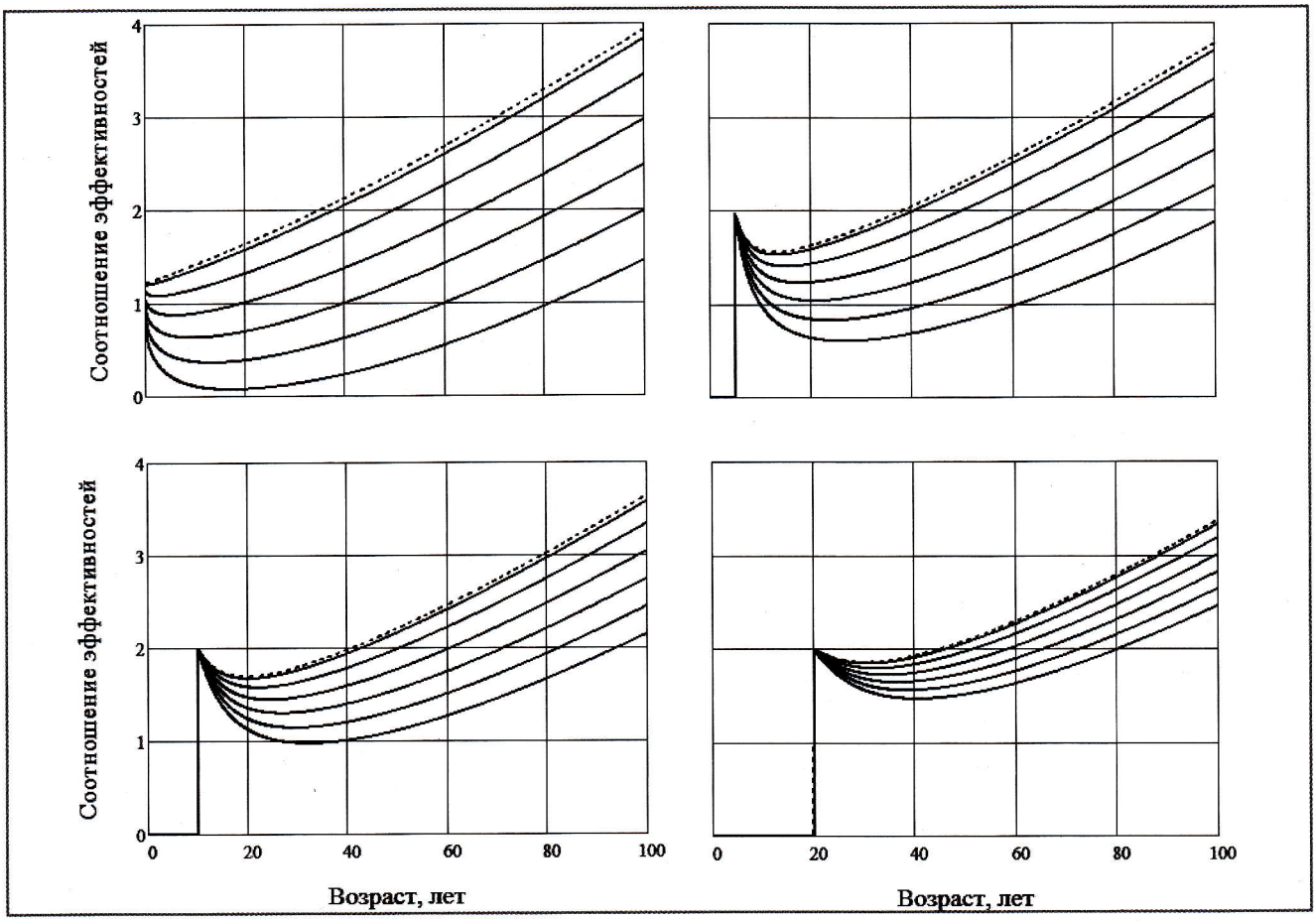

Рис. 2. Зависимость соотношения эффективностей острого и хронического облучений при начале облучения (возрасте острого облучения) с возраста 0 лет (слева вверху), 5 лет (справа вверху), 10 лет (слева внизу) и 20 лет (справа внизу) при мощностях дозы 0,002; 0,005; 0,010; 0,020 и 0,025 мЗв/год в порядке понижения кривых на графиках. Пунктирными кривыми показана зависимость, рассчитанная в приближении независимости рисков.

На рис. 3 показаны оценки границ областей применимости предлагаемого метода (толстая линия) и метода независимых рисков (тонкая линия), основанные на модели относительного риска МКРЗ [7]. Тонкая и толстая линии рассчитаны по формуле (12) при значениях $\xi = 0{,}1$ и $\xi = 1$ соответственно. Следует заметить, что при мощностях дозы, близких к граничным значениям, при которых нарушается условие применимости формулы (5) (а следовательно, и (12)), предлагаемый метод, вероятно, завышает эффекты хронического облучения (см. далее). Однако при значениях мощности дозы, близких к границе применимости метода независимых рисков, такое завышение если и имеется, то мало, так что для мужчин японской когорты и использованных моделей риска МКРЗ эту границу можно считать определенной достаточно точно.

Обсуждение и выводы

Результаты проведенных расчетов показывают, что вклад ЭМФ в радиационное приращение ИС от СР при хроническом облучении может быть весьма значительным, и величина этого вклада, как и весь радиогенный риск, связанный с таким облучением, довольно сильно зависит от возраста начала облучения и от мощности дозы. Вероятно, оценки радиационных приращений ИС от СР, представленные в предыдущем разделе, в случае больших мощностей дозы несколько завышены. Это связано с тем, что во всех расчетах подразумевался линейный выход дополнительных раков от дозы. На самом деле при больших мощностях дозы и накопленных дозах в организме могут активизироваться дополнительные защитные механизмы, о чем свидетельствуют радиобиологические и эпидемиологические данные, выявляющие по мере роста дозы насыщение и даже спад в зависимости доза – эффект при нескольких греях.

Заметим также, что результаты количественной оценки радиационных приращений ИС от СР, представленные в предыдущем разделе, относятся к конкретной группе населения (мужчинам японской когорты) и основываются на конкретных моделях относительного риска и фоновой ИС от СР. Эти результаты, в особенности оценки границ применимости метода, приводились преимущественно в иллюстративных целях. По этой причине мы не учитывали в расчетах наличие латентного периода. Однако его введение в расчеты привело бы к некоторому уменьшению вклада ЭМФ, принципиально не меняя результатов.

Выполненные численные оценки показывают, что в определенных ситуациях, особенно при облучении с малых возрастов, эффективность хронического облучения в расчете на единицу дозы оказывается выше, чем для острого облучения. Следует отметить, что в ряде работ, посвященных изучению последствий хронического облучения на больших группах населения (ра-

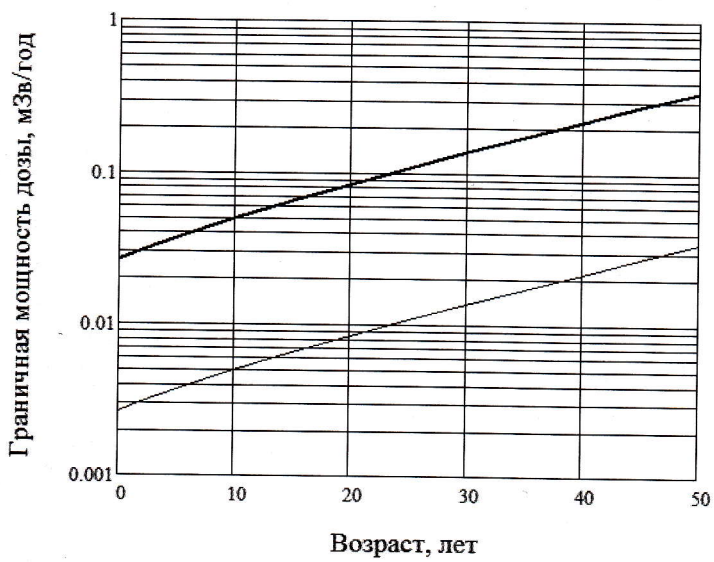

Рис. 3. Максимальные значения мощности дозы, до которых применим предлагаемый метод расчета радиационного приращения ИС от СР (согласно модели относительного риска МКРЗ [4] для мужчин)

бочие предприятий атомной промышленности [9]; лица, проживающие в отдельных населенных пунктах Уральского региона [1; 5] и в районах, затронутых испытаниями на Семипалатинском полигоне [8]), получены неожиданно большие значения для рисков СР по сравнению с теми, которые следовало ожидать исходя из оценок для острого облучения. Эти несоответствия авторы доклада НКДАР ООН [16] склонны объяснять погрешностями дозиметрии и возможными методическими недостатками исследований. Продемонстрированная здесь возможность превышения эффективности хронического облучения по сравнению с острым облучением при обычно реализующихся на практике мощностях дозы позволяет по-иному взглянуть на указанные несоответствия.

Результаты данной работы указывают на возможность повышенной канцерогенной эффективности хронического облучения в детском возрасте, когда оно происходит с момента рождения, особенно для раков с коротким латентным периодом, а также на быстрый рост риска с увеличением мощности дозы. С учетом этого не столь уж необычными выглядят и результаты немецких эпидемиологов, обнаруживших избыточную заболеваемость лейкозами среди детей младше 5 лет, проживавших в пределах 5-километровых зон вокруг германских АЭС [10].

Показанная в проведенных расчетах возможность более высокой эффективности хронического облучения по сравнению с острым облучением и зависимость эффективности хронического облучения от возраста начала облучения и возраста, для которого рассчитывается оценка радиологического риска, выдвигает серьезные вопросы в отношении правомерности рекомендаций МКРЗ по коэффициенту эффективности дозы и мощности дозы. Они касаются не только рекомендованных численных значений DDREF, но и самой концепции DDREF. Она была введена в тот период, когда причину различий в последствиях облучения при больших дозах и мощностях дозы, с одной стороны, и малых дозах и мощностях дозы – с другой усматривали главным образом в характере механизмов действия радиации на клеточном и субклеточном уровнях. Поскольку мало оснований предполагать сильную зависимость радиочувствительности клеток от возраста организма хозяина, вполне логично считалось, что дозы, сообщенные при хроническом облучении в разных возрастах, при оценке DDREF можно просто суммировать. Однако зависимость относительного риска от возраста начала облучения и от достигнутого возраста свидетельствует о наличии возрастного компонента DDREF, связанного с различием распределений дозы по возрастным периодам при разных мощностях дозы.

В заключение заметим, что при обосновании изложенного метода мы не использовали свойства какого-либо конкретного показателя вреда, поэтому метод применим к любому показателю вреда от ионизирующего излучения, характеризующегося мультипликативным механизмом воздействия. Более того, он в принципе применим и к показателям вреда от протяженных воздействий любых других вредных для здоровья факторов, в основе которых лежит мультипликативный механизм.

Выводы

1. Предложен метод расчета приращений интенсивности смертности, обусловленных хроническим облучением, на основе модели относительного риска для однократного острого облучения с учетом эффекта модификации фоновой интенсивности смертности в предшествующий период хронического облучения. Метод в принципе применим к любым вредным факторам, влияющим на здоровье по мультипликативному механизму.
2. Сформулировано в общем виде и конкретизировано на примере модели относительного риска для мужчин из Рекомендаций МКРЗ 2007 г. условие применимости широко используемого метода расчета радиационного приращения интенсивности смертности от солидных раков, основанного на предположении о независимости рисков от разных фракций дозы.
3. Результаты выполненных расчетов показывают, что прирост интенсивности смертности от солидных раков вслед-

ствие эффекта модификации фоновой смертности может составлять проценты при мощностях дозы, сопоставимых с пределом годовой дозы для населения, и в определенных ситуациях достигать нескольких сотен процентов при мощностях дозы, сопоставимых с пределом годовой дозы для персонала.

4. Эффект модификации фоновой смертности дозами предшествующего облучения может быть причиной неожиданно высоких оценок риска рака, часто получаемых в эпидемиологических исследованиях отдаленных последствий облучения на группах населения, которые в течение длительного времени подвергались облучению от техногенных источников.
5. В свете полученных результатов введение коэффициента эффективности дозы и мощности дозы в современную систему радиационной защиты, а также выбор значения 2 для этого коэффициента нуждаются в дополнительном рассмотрении.

Литература

1. Аклеев А.В., Косенко М.М., Крестинина Л.Ю. и др. Здоровье населения, проживающего на радиоактивно загрязненных территориях Уральского региона / Под ред. А.В. Аклеева. М., 2001.
2. Иванов В.К., Меняйло А.Н., Кощеев 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 Ф.Ф., Панфилов А.П. и др. Оптимизация радиационной защиты: «Дозовая матрица». М.: Медицина, 2006.
4. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Кащеев В.В. и др. Индекс безопасности потенциального облучения // Радиация и риск. 2012. Т. 21. № 2. С. 7–20.
5. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Коселева. М., 2001. С. 453.
6. МУ 2.1.10.3014–12 «Оценка радиационного риска у населения за счет длительного равномерного техногенного облучения в малых дозах» // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5. № 4. С. 67–77.
7. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Пер с англ.; под общ. ред. М.Ф. Киселева, Н.К. Шандалы. М., 2009.
8. Bauer S., Gusev B.I., Pivina L.M. et al. Radiation exposure due to local fallout from Soviet atmospheric nuclear weapons testing in Kazakhstan: solid cancer mortality in the Semipalatinsk historical cohort, 1066–1999 // Radiation Research. 2005. Vol. 164. № 1. P. 409–419.
9. Cardis E., Vrijheid M., Blettner V. et al. Risk of cancer after low doses of ionizing radiation – retrospective cohort study in 15 countries // BMJ. 2005. Vol. 89. P. 1–7.
10. Kaatsch P., Spix C., Schulze-Rath R. et al. Leukaemia in young children living in the vicinity of German nuclear power plants // International Journal of Cancer. 2008. Vol. 1220. P. 721–726.
11. Methods for estimating the probability of cancer from occupational radiation exposure IAEA, Vienna, 1996. IAEA-TECDOC-870. IAEA, 1996.
12. Preston D.L., Pierce D.A., Shimizu Y. et al. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates // Radiation Research. 2004. Vol. 162. P. 377–389.
13. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S. et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998 // Radiation Research. 2007. Vol. 168. P. 1–64.
14. Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A. et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality 1950–1997 // Radiation Research. 2003. Vol. 160. P. 381–407.
15. RERF. URL: http://www.rerf.jp/library/dl_e/index.html.
16. UNSCEAR, 2008. Effects of ionizing radiation. United Nations Scientic Committee on the effects of atomic radiation report to the General Assembly with Scientic Annexes.

Приложение

Получение модифицированной фоновой зависимости смертности от возраста начала протяженного облучения и достигнутого возраста

Грубую оценку $\widehat{\mu}_c(t_0,t)$ можно получить, добавив к исходной фоновой ИС от СР радиационное et приращение от предшествующего облучения:

$$\widehat{\mu}_{\tilde{n}}^{(1)}(t_0,t)=\mu_c(t)+\mu_c(t)\cdot\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'=\mu_c(t)\cdot\left[1+\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)\cdot P(t')dt'\right]. \qquad (П1)$$

Подставив результат первой итерации в (П1) вместо $\mu_c(t)$, приходим к более точной оценке:

$$\widehat{\mu}_{\tilde{n}}^{(2)}(t_0,t)=\mu_c(t)\left[1+\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'+\left(\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'\right)^2\right]. \qquad (П2)$$

Дальнейшее применение процедуры уточнения путем замены $\mu_c(t)$ перед квадратными скобками на вновь полученный результат приводит к соотношению:

$$\widehat{\mu}_{\tilde{n}}^{(n)}(t_0,t)=\mu_c(t)\left\{1+\sum_{i=1}^{n}\left[\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'\right]^i\right\}. \qquad (П3)$$

Второе слагаемое в фигурных скобках является суммой n первых членов геометрической прогрессии. Отсюда, воспользовавшись известным выражением для этой суммы, получаем:

$$\mu_c^{(n)}(t_0,t)=\mu_c(t)\left\{1+\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'\frac{1-\left[\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'\right]^n}{1-\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'}\right\}. \qquad (П4)$$

При $n\to\infty$ и выполнении условия:

$$\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'<1, \qquad (П5)$$

отсюда следует искомое соотношение для расчета модифицированной фоновой ИС от СР:

$$\widehat{\mu}_c(t_0,t)=\frac{\mu_c(t)}{1-\int_{t_0}^{t}\varepsilon_{cr}(t',t)P(t')dt'}. \qquad (П6)$$

Контакты:

Губин Анатолий Тимофеевич,
заместитель директора по научным вопросам ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены» ФМБА России,
канд. физ.-мат. наук.
Тел. раб.: 8-499-193-74-12;
Тел. моб.: 8-910-403-67-04.
E-mail: atgubin@rambler.ru