

Коэффициенты перехода от индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения

В.Ю. Голиков

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены значения коэффициентов перехода от операционной величины $H_p(10)$ к нормируемой величине — эффективной дозе. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда позиций индивидуальных дозиметров, расположенных на поверхности торса расчетной модели MIRD-5 тела взрослого человека. Моделируемые условия соответствовали как равномерному, так и резко неравномерному облучению работника в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение эффективной дозы и $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения для направлений его падения спереди и с левого бока, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой эффективной дозы. При падении излучения сзади и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение эффективной дозы и $H_p(10)$ существенно больше (для энергий $< 0,1$ МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой эффективной дозы. В пространственно-неоднородных полях фотонного излучения с увеличением степени неравномерности облучения тела работника значения коэффициентов перехода уменьшались. При облучении спереди и слева и размещении индивидуального дозиметра в «типичном» положении $H_p(10)$ консервативно оценивает значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий. При облучении справа и размещении индивидуального дозиметра в «типичном» положении значение $H_p(10)$ будет занижать эффективную дозу во всем рассмотренном диапазоне энергий. Продемонстрировано, что оптимальное расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение эффективной дозы даже при существенно изменяющихся геометриях его облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Ключевые слова: операционные величины, эффективная доза, расчетная модель, коэффициенты перехода, фотонное излучение.

Введение

Нормируемые величины, эквивалентная и эффективная дозы, служащие основой для принятия мер радиационной защиты персонала [1–3], на практике не измеряемы. Поэтому их необходимо определять на основании других измеряемых величин, называемых операционными [4–7]. При контроле полей излучения на рабочих местах персонала для оценки эффективной дозы (ЭД) используют мощность амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, а измерения проводят в воздухе. Для контроля индивидуального облучения используют

индивидуальные дозиметры, располагаемые на поверхности тела работника, а в качестве оценки ЭД – индивидуальный эквивалент дозы $H_p(10)$. Интерпретация результатов измерений $H^*(10)$ и $H_p(10)$ при оценке ЭД должна основываться на количественных соотношениях (коэффициентах перехода (КП)) между операционными и нормируемыми величинами, зависящих от типа поля излучения, его энергетического спектра, геометрии облучения работника, а в случае индивидуального дозиметрического контроля – и места расположения дозиметра на теле.

Голиков Владислав Юрьевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

Коэффициенты перехода от $H_p(10)$ к ЭД достаточно подробно рассмотрены в литературе для класса так называемых пространственно-инвариантных полей излучения, т.е. полей, характеристики которых не изменяются по области пространства, занимаемой человеком [8, 9]. $H_p(10)$, согласно его определению, «...на соответствующей глубине, d , под заданной точкой на поверхности тела человека» [2] в принципе может варьироваться между людьми. Более того, если значение d определено и равно 10 мм для сильно проникающего излучения, то положение дозиметра на теле не определено. Следовательно, значение $H_p(10)$ при одной и той же геометрии облучения может изменяться в зависимости от расположения дозиметра на теле работника, т.е. являться неоднозначным [9, 10]. Чтобы сделать эту величину однозначной, необходимо определить положение индивидуального дозиметра на теле работника.

Для полей фотонного излучения, изменяющих свои характеристики в области пространства, занимаемой человеком, систематических опубликованных данных о значениях КП от $H_p(10)$ к ЭД обнаружить не удалось. В реальных ситуациях с набором геометрий облучения, изменяющихся в течение всего производственного цикла обращения с техногенным источником, необходимо разрабатывать модель облучения работника, центральным звеном которой должен являться адекватный выбор оптимального (репрезентативного) места расположения индивидуального дозиметра, обеспечивающий относительную инвариантность отношения нормируемой и операционной величин для всех геометрий облучения работника.

Цель исследования – изучение поведения коэффициентов перехода от $H_p(10)$ к ЭД (Публикация №60 МКРЗ) в полях фотонного излучения с различной степенью неравномерности облучения тела человека для анализа влияния положения индивидуального дозиметра на соотношение нормируемых и операционных величин.

Материалы и методы

Значения КП оценивали расчетным путем с использованием компьютерной программы «РАДОФАН» (Расчет Доз в Фантоме) [11], позволяющей вычислять как ЭД, так и отношение ЭД/ $H_p(10)$ в 48 точках, расположенных на глубине 10 мм под поверхностью торса расчетной модели MIRD-5 тела человека различного возраста [12, 13]. Моделируемые в расчете условия облучения соответствовали как равномерному (плоскопараллельный источник) облучению тела работника с различными направлений (спереди – AP, сзади – PA и сбоку, левого – LLAT или правого – RLAT), так и резко неравномерному (точечный источник на различных расстояниях от фантома) в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ.

В качестве данных для верификации собственных расчетов использовали результаты расчетов методом Монте-Карло значений КП от $H_p(10)$ к ЭД, заимствованных из Публикации №74 МКРЗ [9] и работы М. Zankl [14]. Последняя работа является практически единственной, обнаруженной нами, где рассчитывались соотношения между ЭД и $H_p(10)$ в различных точках на поверхности воксельного фантома взрослого человека [15] при его облучении в полях моноэнергетического фотонного из-

лучения плоскопараллельного источника. В качестве значений $H_p(10)$ в Публикации № 74 МКРЗ используют дозу, рассчитанную на глубине 10 мм в фантоме в виде прямоугольного параллелепипеда (30 см × 30 см × 15 см) из тканезквивалентного материала. В работе М. Zankl и в настоящем исследовании в качестве значений $H_p(10)$ использовали расчеты доз на глубине 10 мм в разных локациях на поверхности торса расчетной модели, имеющей кривизну и зоны гетерогенности (легкие с меньшей плотностью, чем мягкие ткани). Там, где не отмечено иное, в качестве $H_p(10)$ использовали «показания» индивидуального дозиметра, расположенного в типичной локации на передней поверхности торса работника, – 14 см ниже щитовидной железы со смещением влево на 8 см (рис. 1).



Рис. 1. Типичное расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника

[Fig. 1. A typical location of an individual dosimeter on the surface of the employee's body]

Кроме того, для валидации расчетов в условиях неравномерного облучения работника использовали результаты собственных фантомных экспериментов с точечным источником радионуклида ^{60}Co , располагавшимся на расстояниях 20 см, 50 см, 100 см и 250 см от поверхности физического фантома Alderson Rando [16], аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели. Измерения, техника выполнения которых была неоднократно описана нами ранее [17–19], выполнялись с помощью термолюминесцентных детекторов. Погрешность определения доз не превышала $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 95%.

Результаты и обсуждение

Плоскопараллельные источники (равномерное облучение поверхности тела)

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетов зависимости отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлениями падения излучения на расчетную модель AP и LLAT и PA соответственно. Представлены результаты собственных расчетов в сравнении с данными, заимствованными из Публикации № 74 МКРЗ [9] и работы М. Zankl [14]. Результаты расчетов из Публикации № 74 МКРЗ и из работы М. Zankl, полученные с помощью метода Монте-Карло, могут считаться эталонными.

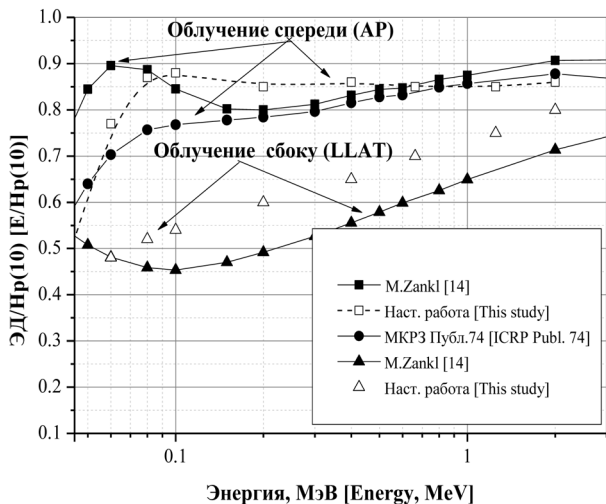


Рис. 2. Зависимость отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлениями падения излучения на расчетную модель AP и LLAT
[Fig. 2. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a plane-parallel source with directions of radiation incidence to the computational model AP and LLAT]

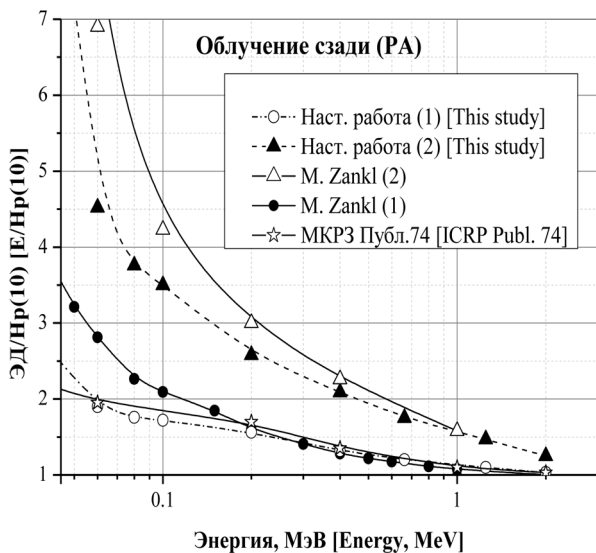


Рис. 3. Зависимость отношения ЭД/ $H_p(10)$ от энергии фотонов плоскопараллельного источника с направлением падения излучения сзади (РА) на расчетную модель. Цифра (1) соответствует «показаниям» дозиметра, расположенного в типичной локации (на уровне легких), а цифра (2) – «показаниям» дозиметра, расположенного на 40 см ниже (на уровне живота)
[Fig. 3. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a plane-parallel source with directions of radiation incidence to the computational model from the back (PA). The number (1) corresponds to the “readings” of the dosimeter located in a typical location (at the level of the lungs) and the number (2) is “readings” of the dosimeter located 40 cm lower (at the level of the abdomen)]

Для более осмысленного сравнения результатов расчетов из различных литературных источников между собой укажем на то, что значения ЭД из Публикации № 74 МКРЗ и при выполнении собственных расчетов с помо-

щью компьютерной программы «РАДОФАН» [11] соответствовали расчетной модели тела человека MIRD-5, а из работы М. Zankl – воксельному фантому взрослого мужчины «Golem» [15], прототипу расчетной модели Reference Male [20]. Кроме того, компьютерная программа «РАДОФАН», применявшаяся для расчетов ЭД в настоящем исследовании, использует многогрупповое приближение в описании спектра фотонного излучения, вместо моноэнергетических фотонов, использовавшихся при расчетах КП методом Монте-Карло для Публикации №74 МКРЗ и в работе М. Zankl. Последнее обстоятельство обуславливает дополнительную погрешность результатов собственных расчетов, особенно в области малых энергий излучения (< 0,06 МэВ).

С учетом вышеизложенного, отметим, что результаты расчета отношения ЭД/ $H_p(10)$, выполненные в настоящем исследовании для энергий фотонного излучения выше 0,06 МэВ, отличаются от аналогичных результатов из Публикации №74 МКРЗ и работы [14] не более чем на 20%. Для энергии излучения 0,04 МэВ эти различия увеличиваются до 30–40% по причинам, указанным выше.

Для направлений падений излучения AP и LLAT и «типичном» расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение ЭД/ $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД.

При падении излучения сзади и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника (т.е. спереди) во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение ЭД/ $H_p(10)$ существенно больше (для энергий < 0,1 МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД. При этом степень недооценки ЭД по показаниям индивидуального дозиметра зависит от его положения на теле работника. Так, например, для энергии фотонов 0,1 МэВ отношение ЭД/ $H_p(10)$ ~ 2 для дозиметра, расположенного в типичной локации (на уровне легких с плотностью, меньшей, чем у мягких тканей), а для дозиметра, расположенного ниже на 40 см (на уровне мягких тканей брюшной полости), ЭД/ $H_p(10)$ ~ 4. Однако эта проблема может быть разрешима путем правильного расположения дозиметра (дозиметров) на теле работника после предварительного изучения характеристик полей излучения на его рабочем месте (см. также ниже).

Точечные источники на конечном расстоянии от поверхности тела (неравномерное облучение)

Достаточно часто персонал при работе с источниками фотонного излучения подвергается неравномерному облучению (персонал, занятый неразрушающим контролем оборудования, различные категории медицинского персонала). Для таких условий облучения человека нам не удалось обнаружить систематических данных о соотношении ЭД/ $H_p(10)$, чтобы оценить, являются ли в этом случае показания индивидуального дозиметра консервативной оценкой ЭД.

Для этих условий облучения мы ограничились рассмотрением следующих геометрий облучения AP, LLAT и RLAT, т.к. маловероятны штатные (неаварийные) условия работы с источниками излучения при геометрии облучения PA, особенно на малых расстояниях от тела. Результаты рас-

четов значений КП от $H_p(10)$ к эффективной дозе (отношения $\text{ЭД}/H_p(10)$) с помощью компьютерной программы «РАДОФАН» для типичного положения индивидуального дозиметра на теле работника представлены на рисунках 4–6 для облучения спереди, справа и слева соответственно. На рисунке 4 также представлены результаты фантомного эксперимента с точечным источником радионуклида ^{60}Co , располагавшимся спереди на расстояниях 20 см, 50 см, 100 см и 250 см от поверхности физического фантома Alderson Rando, аналогичного по своим антропометрическим характеристикам расчетной модели.

Результаты расчетов и эксперимента свидетельствуют о следующем:

1. Сравнение расчетных значений коэффициента перехода с результатами измерений, полученных с помощью фантомного эксперимента, показало хорошее согласие обоих наборов данных. Максимальное относительное отличие расчетного результата от результата измерений составило 18% при расстоянии $R=20$ см, а в остальных случаях оно не превышало 10%.

2. С уменьшением расстояния от источника излучения до поверхности тела (увеличением неравномерности облучения) значение КП уменьшается.

3. При облучении AP и LLAT $H_p(10)$ у индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, консервативно оценивают значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий.

4. При облучении RLAT $H_p(10)$ у индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, будут занижать значение эффективной дозы во всем рассмотренном диапазоне энергий. Таким образом, как и в случае облучения работника сзади, возникает необходимость в репрезентативном расположении индивидуального дозиметра на поверхности тела.

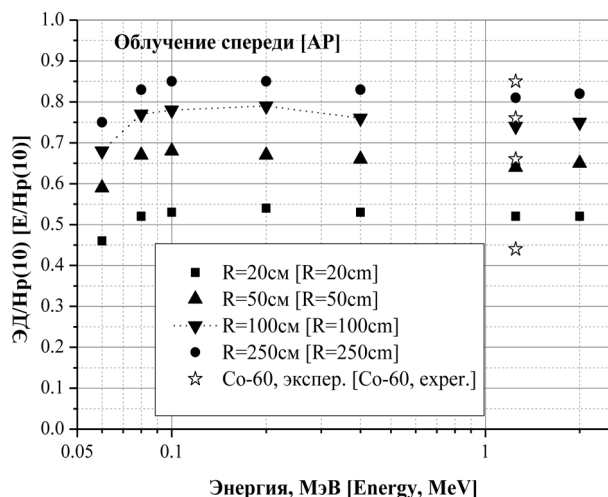


Рис. 4. Зависимость отношения $\text{ЭД}/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного спереди на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 4. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located in front at different distances R from the surface of the employee's body]

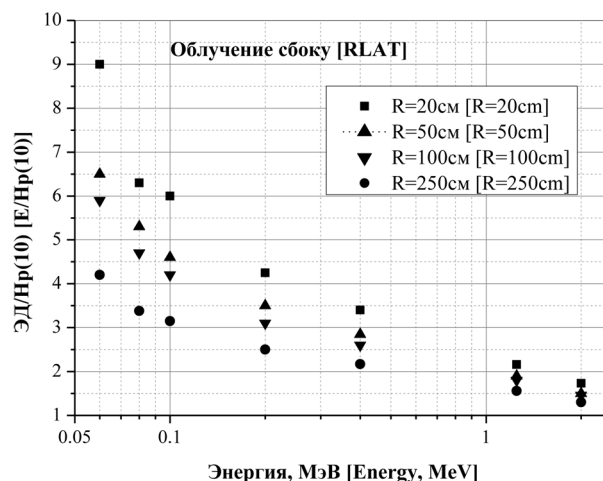


Рис. 5. Зависимость отношения $\text{ЭД}/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного RLAT на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 5. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located RLAT at different distances R from the surface of the employee's body]

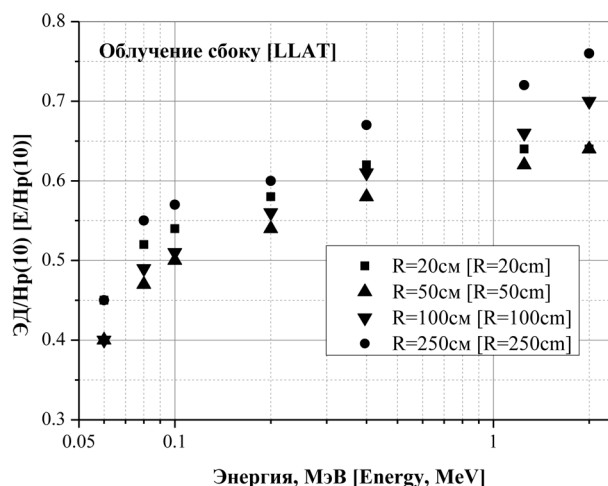


Рис. 6. Зависимость отношения $\text{ЭД}/H_p(10)$ от энергии фотонов точечного источника, расположенного LLAT на различных расстояниях R от поверхности тела работника
[Fig. 6. Dependence of the $E/H_p(10)$ ratio on the photon energy of a point source located LLAT at different distances R from the surface of the employee's body]

Пример выбора положения дозиметра на теле работника при построении модели профессионального облучения

В процессе использования источников ионизирующего излучения в производственной деятельности представители той или иной категории персонала могут облучаться последовательно в разных геометриях, для которых, как было продемонстрировано выше, значения КП от $H_p(10)$ к эффективной дозе могут существенно раз-

личаться. Однако в конце периода контроля мы измеряем интегральное значение $H_p(10)$, и непонятно, какое значение КП использовать для оценки ЭД. Решением этой проблемы могло бы стать расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника в таком месте, где значения КП были бы приблизительно одинаковы в разных геометриях облучения во время всего производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Поясним это на следующем примере. Рассмотрим условия облучения медицинского персонала, работающего с радиофармацевтическими препаратами (РФП) на основе радионуклида ^{131}I в отделениях радионуклидной терапии. В этом случае можно выделить следующие ситуации облучения [21] (рис. 7):

1. Перенос флаконов с РФП в защитных контейнерах (рис. 7А) к месту заправки шприца (вытяжной шкаф).
2. Фасовка РФП в шприцы у защитного шкафа (рис. 7Б).
3. Транспортировка в защитном контейнере шприцов к капельнице (рис. 7А).
4. Введение РФП из шприца в капельницу (рис. 7В).

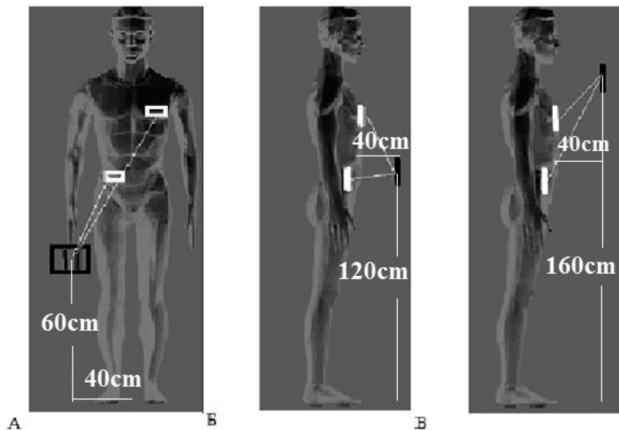


Рис. 7. Геометрия облучения медицинского персонала при выполнении отдельных операций с РФП в отделениях радионуклидной терапии. Белыми прямоугольниками показаны положения индивидуальных дозиметров, черными – контейнеры или флаконы с РФП

[Fig. 7. The geometry of medical staff irradiation during performing separate operations with the activity in radionuclide therapy departments. White rectangles indicate locations of the individual dosimeters, black – containers or flacons with the activity]

На основании данных о взаимном расположении источника ^{131}I (Еср. ~ 0,4 МэВ) по отношению к работнику [21] с помощью компьютерной программы «РАДОФАН» были рассчитаны следующие значения КП от $H_p(10)$ к ЭД:

При типичном расположении индивидуального дозиметра:

- для операций (1) и (3) ЭД/ $H_p(10)$ =35 при переноске контейнера правой рукой и ЭД/ $H_p(10)$ =2,3 при переноске контейнера левой рукой;
- для операции (2) ЭД/ $H_p(10)$ =0,58;
- для операции (4) ЭД/ $H_p(10)$ =0,41.

При оптимальном расположении индивидуального дозиметра справа на уровне талии и переноске контейнера правой рукой:

- для операций (1) и (3) ЭД/ $H_p(10)$ =0,61;
- для операции (2) ЭД/ $H_p(10)$ =0,54;
- для операции (4) ЭД/ $H_p(10)$ =0,92.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в первом случае при типичном, но не оптимальном расположении индивидуального дозиметра разброс значений КП для отдельных операций с источником составляет от 5 раз до более чем 50 раз в зависимости от того, с какой стороны тела выполняется операция переноски контейнера с РФП. Во втором же случае при оптимальном расположении индивидуального дозиметра (справа на уровне талии) разброс значений КП для отдельных операций с источником составляет менее 2 раз, что позволяет с небольшой степенью консерватизма для оценки ЭД использовать максимальное значение КП. Таким образом, оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на теле работника будет обеспечивать вполне адекватную оценку значения ЭД за весь производственный цикл.

Заключение

В статье представлены значения коэффициентов перехода от операционной величины $H_p(10)$ к эффективной дозе. Моделируемые условия облучения соответствовали как равномерному (плоскопараллельный источник), так и резко неравномерному (точечный источник на разных расстояниях от фантома) облучению работника в полях фотонного излучения с энергией от 0,04 до 2 МэВ. Коэффициенты перехода рассчитывались для ряда положений индивидуального дозиметра на поверхности торса расчетной модели тела взрослого человека MIRD-5.

Было продемонстрировано, что для однородных в пространстве полей излучения, направлений падения излучения спереди и сбоку (LLAT) и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника отношение ЭД/ $H_p(10)$ меньше единицы во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения, т.е. $H_p(10)$ является консервативной оценкой ЭД. При падении излучения сзади и типичном расположении индивидуального дозиметра на теле работника во всем диапазоне рассматриваемых энергий фотонного излучения отношение ЭД/ $H_p(10)$ существенно больше (для энергий < 0,1 МэВ) или близко к единице, т.е. $H_p(10)$ не является консервативной оценкой ЭД.

В пространственно-неоднородных полях фотонного излучения с увеличением степени неравномерности облучения тела работника значения КП уменьшаются. При облучении спереди и слева значения $H_p(10)$ для индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, консервативно оценивают значение эффективной дозы у работника во всем рассмотренном диапазоне энергий. При облучении справа значения $H_p(10)$ для индивидуального дозиметра, размещенного в типичном положении, будут занижать значение эффективной дозы во всем рассмотренном диапазоне энергий.

На примере персонала отделений ядерной медицины было продемонстрировано, что оптимальное (репрезентативное) расположение индивидуального дозиметра на поверхности тела работника позволяет адекватно оценивать по его показаниям значение ЭД даже при существенно изменяющихся геометриях облучения во время полного производственного цикла обращения с источником ионизирующего излучения.

Информация о конфликте интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовки данной статьи.

Литература

1. International Commission on Radiological Protection. (1990) 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 Ann. ICRP 21 (1-3) 1-201.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. / Под общ. ред. М.Ф. Киселёва и Н.К. Шандалы. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.
3. «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введены в действие от 07.07.09 г. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
4. ICRU, 1988. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
5. ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
6. ICRU, 1998. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
7. ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66 // Journal of ICRU 1 (3).
8. ICRP 2010 Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures Publication 116 40 (2–5) (London: Elsevier).
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Oxford, UK Pergamon Press; ICRP Publication 74; Ann. ICRP. 1996. Vol. 26, No 3/4. P. 1-205.
10. Wagner S.R. The definition of the individual dose equivalent // Radiation Protection Dosimetry. 1987. Vol. 20. P. 271-273.
11. Голиков В.Ю. Метод и компьютерная программа расчета доз фотонного излучения в фантомах тела человека // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 55-65.
12. Snyder W.S., Ford M.R., Warner G.G., Watson G.G. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
13. Han E.Y., Bolch W.E., Eckerman K.F. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema // Health Physics. 2006. Vol. 90, No 4. P. 337–356.
14. Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position // Health Physics. 1999. Vol. 76, No 2. P. 162-170.
15. Zankl M., Petoussi-Henß N., Wittmann A. The GSF voxel phantoms and their application in radiology and radiation protection. In: Proceedings of a Workshop on Voxel Phantom Development, 6-7 July 1995. Chilton, UK: National Radiological Protection Board. 1996. P. 98-104.
16. Alderson S.W., Lanzl L.H., Rollins M., Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans // American Journal of Roentgenology. 1962. No. 87. P. 185.
17. Golikov V.Yu., Nikitin V.V. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements // Health Physics. 1989. Vol. 56, No 1. P. 111–115.
18. Golikov V., Wallström E., Wöhni T. et al. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms // Radiation Environmental Biophysics. 2007. Vol. 46, No 4. P. 375-382.
19. Golikov V., Barkovsky A., Wallström E., Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 178, No 2. P. 223–234.
20. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
21. Голиков В.Ю., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Смолярчук М.Я. Некоторые аспекты радиационной защиты в отделениях радионуклидной терапии // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14, №1. С. 75-85.

Поступила: 25.07.2022 г.

Голиков Владислав Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория радиационной гигиены медицинских организаций, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: sg235@rambler.ru

Для цитирования: Голиков В.Ю. Коэффициенты перехода от показаний индивидуальных дозиметров к эффективной дозе в полях фотонного излучения и их использование при разработке моделей профессионального облучения // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15, № 4. С. 69-76. DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76

The conversion coefficients from $H_p(10)$ to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models

Vladislav Yu. Golikov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The paper presents the values of the conversion coefficients from the operational quantity, $H_p(10)$ to the protection quantity, effective dose (E). The conversion coefficients were calculated in a number of points located at a depth of 10 mm under the surface of the torso of the computational model MIRD-5 of the body of an adult. The simulated irradiation conditions corresponded to both uniform and sharply non-uniform irradiation of the employee in the fields of photon radiation with the energy from 0.04 to 2 MeV. It was demonstrated that for the uniform radiation and the "typical" location of the individual dosimeter on the employee's body, the $E/H_p(10)$ ratio is less than one in the entire range of radiation energies for the directions of its incidence in front and from the left side, i.e. $H_p(10)$ is a conservative assessment of E . When the radiation falls on the back and for the "typical" location of an individual dosimeter on the employee's body in the entire range of radiation energies, the ratio $E/H_p(10)$ is significantly larger (for the energies <0.1 MeV) or close to one, i.e. $H_p(10)$ is not a conservative assessment of E . In the spatial non-uniform fields of photon radiation with an increase in the degree of non-uniformity irradiation of the employee's body, the values of the conversion coefficients decreased. When irradiation in front and from the left side an individual dosimeter placed in a "typical" position will be conservative estimate the value of an effective dose of the employee in the entire considered range of energies. When irradiation on the right side an individual dosimeter placed in a "typical" position will underestimate the value of an effective dose in the entire considered range of energy. It was demonstrated that the optimal location of the individual dosimeter on the surface of the employee's body allows us to adequately assess according to his indications the value of an effective dose even with significantly changing geometry of its irradiation during a complete cycle of treatment with the source of ionizing radiation.

Key words: operational quantity, effective dose, computational model, conversion coefficient, photons.

Conflict of interest

The author declares the absence of a conflict of interests during performing the work and preparing this paper.

References

1. International Commission on Radiological Protection. (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 Ann. ICRP. 1990;21(1-3): 1-201.
2. International Commission on Radiological Protection 2007 The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 Ann. ICRP. 2007;37: 1–332.
3. Sanitary rules and norms. SanPiN 2.6.1.2523-09. Norms of the radiation safety (NRB 99/2009). Registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 14.08.2009 N 14534. (In Russian).
4. ICRU, 1988. Measurement of dose equivalents from external radiation sources, Part 2. ICRU Report 43. ICRU Publications: Bethesda, MD.
5. ICRU, 1993b. Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report ICRU Publications: Bethesda, MD. ICRU, 1997. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD.
6. ICRU, 1998. Fundamental quantities and units for ionizing radiation. ICRU Report 60. ICRU Publications: Bethesda, MD.
7. ICRU, 2001b. Determination of operational dose equivalent quantities for neutrons. ICRU Report 66. *Journal of ICRU*. 1 (3).
8. ICRP 2010 Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures Publication 116 40 (2–5) (London: Elsevier).
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. Oxford, UK Pergamon Press; ICRP Publication 74; Ann. ICRP. 1996;26(3/4): 1-205.
10. Wagner SR. The definition of the individual dose equivalent. *Radiation Protection Dosimetry*. 1987;20: 271-273.
11. Golikov VYu. Method and software for photon dose calculation in phantoms of human body. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 55-65. (In Russian).
12. Snyder WS, Ford MR, Warner GG, Watson GG. Revision of MIRD Pamphlet No 5 Entitled 'Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom' ORNL-4979. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory; 1974.
13. Han EY, Bolch WE, Eckerman KF. Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRD schema. *Health Physics*. 2006; 90(4):337–356.
14. Zankl M. Personal dose equivalent for photons and its variation with dosimeter position. *Health Physics*. 1999;76(2): 162-170.

Vladislav Yu. Golikov

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru

15. Zankl M, Petoussi-Henß N, Wittmann A. The GSF voxel phantoms and their application in radiology and radiation protection. In: Proceedings of a Workshop on Voxel Phantom Development, 6-7 July 1995. Chilton, UK: National Radiological Protection Board. 1996: 98-104.
16. Alderson SW, Lanzi LH, Rollins M, Spira I. An instrumented phantom system for analog computation of treatment plans. *American Journal of Roentgenology*. 1962;87: 185.
17. Golikov VY, and Nikitin VV. Estimation of mean organ doses and effective dose equivalent from Rando Phantom measurements. *Health Physics*. 1989;56(1): 111–115.
18. Golikov V, Wallström E, Wöhni T, Tanaka K, Endo S, Hoshi M. Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms. *Radiation Environ. Biophysics*. 2007;46(4): 375-382.
19. Golikov V, Barkovsky A, Wallström E, Cederblad Å. A comparative study of organ doses assessment for patients undergoing conventional X-ray examinations: phantom experiments vs. calculations. *Radiation Protection Dosimetry*. 2018;178(2): 223–234.
20. ICRP, 2009. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39(2).
21. Golikov VYu, Chipiga LA, Vodovatov AV, Smolyarchuk MYa. Some aspects of radiation protection in radionuclide therapy departments. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2021;14(1): 75-85. (In Russian).

Received: July 25, 2022

For correspondence: Vladislav Yu. Golikov – Senior Researcher of the Medical Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: sg235@rambler.ru)

For citation: Golikov V.Yu. The conversion coefficients from Hp(10) to effective dose in the fields of photon radiation and their use in the development of occupational exposure models. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022. Vol. 15, No. 4, P. 69-76. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-69-76