

# Экспериментальное исследование характеристик индивидуальных термолюминесцентных дозиметров для измерения эквивалентных доз в коже и хрусталике глаза

Е.Н. Шлеенкова

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

*В работе дана сравнительная характеристика имеющихся и вновь разработанных термолюминесцентных детекторов ДТГ-4, ТТЛД-580, ТЛД-1011 (ТМ), ДТВС-01 и дозиметров МКД-А, МКД-Б для целей индивидуального дозиметрического контроля облучения кожи и хрусталика глаза. Экспериментально определена зависимость чувствительности различных термолюминесцентных дозиметров, предназначенных для измерения эквивалентных доз в коже рук и хрусталике глаза от вида (фотоны и  $\beta$ -частицы) и энергии излучения.*

*Сделаны выводы о границах применимости имеющихся детекторов и дозиметров при различных условиях облучения.*

*Дана оценка возможности использования на практике различных дозиметров в конкретных условиях облучения.*

**Ключевые слова:** индивидуальный дозиметрический контроль, термолюминесцентный метод, слабопроникающее излучение, индивидуальный эквивалент дозы в коже и хрусталике глаза.

## Введение

Действующими Нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009 [1] установлен основной дозовый предел облучения кожи, кистей рук, стоп и хрусталика глаза, равный эквивалентной дозе 500 мЗв/год и 150 мЗв/год соответственно, но вопросам измерения доз облучения кожного покрова и хрусталика глаза слабопроникающим излучением [2], а также дозиметрии в смешанных полях излучения уделяется в нашей стране недостаточно внимания.

В связи с тем, что производители термолюминесцентных (ТЛ) дозиметров предоставляют информацию общего характера, указывая лишь вид излучения и границы энергетического диапазона, не приводя конкретных данных об изменении отклика детекторов в зависимости от энергии, потребовалось проведение исследований характеристик и возможностей применения имеющихся и вновь разработанных детекторов для целей индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) облучения кожи и хрусталика глаза.

**Цель исследования** – экспериментально определить зависимость чувствительности различных ТЛ-дозиметров, предназначенных для измерения эквивалентных доз в коже рук и хрусталике глаза  $H_p(0,07)$  и  $H_p(3)$  соответственно, от вида (фотоны и  $\beta$ -частицы) и энергии излучения.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Анализ особенностей дозиметрии слабопроникающих излучений.
2. Экспериментальное исследование характеристик термолюминесцентных детекторов и дозиметров при различных условиях облучения.
3. Оценка возможностей использования различных дозиметров на практике.

## Особенности дозиметрии слабопроникающих излучений

В НРБ-99/2009 [1] принято, что эквивалентная доза в коже соотносится с критическим – базальным слоем эпидермиса толщиной 5 мг/см<sup>2</sup>, находящимся на глубине 5 мг/см<sup>2</sup>, за исключением кожи ладоней, для которых толщина экранирующего слоя составляет 40 мг/см<sup>2</sup>. Эквивалентная доза в коже, согласно НРБ-99/2009, соотносится с таковой на глубине 0,07 мм, из вышесказанного можно сделать предположение, что это усредненная глубина базального слоя плюс толщина рогового слоя.

Наиболее радиочувствительной областью хрусталика глаза принято считать зону роста эпителия, находящуюся у поверхности хрусталика. Эквивалентная доза в хрусталике глаза, согласно НРБ-99/2009, соотносится с таковой на глубине 300 мг/см<sup>2</sup>.

Рабочей дозиметрической величиной при индивидуальном мониторинге является эквивалент индивидуальной дозы  $H_p(d)$  [3–4]. Он представляет собой эквивалент дозы в мягкой биологической ткани под заданной точкой тела на соответствующей глубине  $d$ . Одним из возможных подходов при измерении  $H_p(d)$  может быть использование детектора, носимого на поверхности тела и покрытого тканезквивалентным материалом соответствующей толщины.

В любое определение эквивалента индивидуальной дозы следует включать указание характерной глубины  $d$  в миллиметрах.

МКРЕ (1993) установило, что величина  $H_p(10)$  предназначена только для мониторинга сильнопроникающего излучения, например, фотонов с энергией свыше 30 кэВ и нейтронов, тогда как  $H_p(0,07)$  применяется для мониторинга слабопроникающего излучения: фотонов с энергией ниже 30 кэВ и  $\beta$ -частиц. Более того,  $H_p(0,07)$  также ис-

пользуется для мониторинга дозы в кистях рук и ступнях ног при воздействии излучения любого вида и энергии, хотя в особых случаях могут быть использованы и другие глубины (например, для хрусталика глаза 3 мм, Нр (3)) [3].

Такое разделение связано с тем, что механизмы дозирования от сильно- и слабопроникающих внешних излучений различны: сильнопроникающие излучения главным образом воздействуют на внутренние органы человека и создают дозы в них, тогда как доза от слабопроникающих излучений создается только во внешних органах и тканях тела, таких как хрусталик глаза и кожа. Слабопроникающие излучения создают максимальные дозы в радиочувствительном базальном слое кожи на глубине от 0,05 до 0,1 мм и в хрусталике глаза на глубине 3 мм.

Сложности дозиметрии  $\beta$ -излучения объясняются особенностями процессов взаимодействия излучения с веществом – резкие изменения потоков и энергий от точки к точке по глубине поглотителя [5].

При фотонном излучении с энергией 1–10 кэВ сечение взаимодействия с веществом резко возрастает за счет фотоэффекта с уменьшением энергии излучения. Потери низкоэнергетического гамма-излучения на единицу пути на 1–2 порядка больше, чем для высокоэнергетического, и, следовательно, наблюдается сильная зависимость распределения эквивалентной дозы от глубины прохождения. Этими обстоятельствами и обусловлены трудности прямого измерения доз данного вида излучения.

### Материалы и методы

В работе использовались ТЛ-детекторы, предназначенные для измерения эквивалентных доз в коже Нр (0,07) и хрусталике глаза Нр (3):

– ДТГ-4 – монокристаллические детекторы, состав которых – LiF (Mg, Ti). Толщина  $\approx 1,05$  мм, диаметр – 4,5 мм. Для данных исследований использовалась партия детекторов с разбросом по чувствительности не хуже  $\pm 15\%$ .

– ТТЛД-580 производства НПП «Доза» (в составе дозиметров МКД тип А и Б) – детекторы изготовлены из гомогенной композиции мелкодисперсного термолуминофора  $MgB_4O_7$  и полиимидной смолы марки ПМ-1. Толщина  $\approx 10$  мг/см<sup>2</sup> ( $\approx 100$  мкм), диаметр – 9 мм (дозиметр МКД-Б), диаметр – 15 мм (дозиметр МКД-А).

– МКД-А дозиметр для измерения эквивалентных доз фотонного и  $\beta$ -излучения в хрусталике глаза и коже лица. Представляет собой составную кассету из ударопрочного, химически и радиационно устойчивого, тканеэквивалентного материала. Внутри имеются вращающиеся на одной оси подложки-поглотители толщиной 50, 100 и 110 мг/см<sup>2</sup>, на которые помещаются детекторы ТТЛД-580 диаметром 15 мм. Толщина защитного входного окна, за которым находится первый детектор, составляет примерно 2 мг/см<sup>2</sup>. Последний детектор монокристалл фтористого лития ДТГ-4 расположен на глубине 300 мг/см<sup>2</sup> и служит для измерения доз в хрусталике глаза.

– МКД-Б – дозиметр для измерения эквивалентных доз фотонного и  $\beta$ -излучения в коже пальцев рук. Состоит из набора детекторов ТТЛД-580, разделенных тканеэквивалентными поглотителями, толщина которых выбрана таким образом, чтобы первые два детектора измеряли дозу на глубине 35 и 45 мг/см<sup>2</sup>, а остальные детекторы – на глубинах 95 и 155 мг/см<sup>2</sup>. Набор детекторов запаян в полиэтиленовый конверт и помещен на гибкую несущую

основу, с помощью которой он крепится на внутренней стороне фаланг пальцев рук. Номер дозиметра находится на тыльной стороне.

– ТЛД – 1011(ТМ) производства НТЦ «Практика» (г. Москва). Поликристаллический, состав LiF (Mg,Cu,P). Толщина кристаллофосфора – 5–7 мг/см<sup>2</sup>, диаметр – 5 мм. Кристаллофосфор нанесен на рабочую поверхность чаши из алюминия толщиной 21 мг/см<sup>2</sup>.

– ДТВС-01 производства ОАО «АЭХК (г. Ангарск). Детекторы на основе термолуминофора LiF(Mg,Ti) в полиимидной пленке. Толщина кристаллофосфора – 5 мг/см<sup>2</sup>, диаметр 12 мм.

Для всех детекторов исследовались следующие характеристики:

- коэффициенты чувствительности в зависимости от вида излучения и энергии (К, [имп/МЗв]);
- эргономические характеристики (удобство использования).

Для снятия дозиметрической информации использовался прибор дозиметрический термолуминесцентный ДВГ-02ТМ с возможностью изменения профиля нагрева и автоматическим вычитанием собственного фона детекторов.

Облучение детекторов производилось на эталонных установках ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в полях  $\beta$ -излучения источника  $Sr^{90}/Y^{90}$  и  $Pm^{147}$ , а также в поле рентгеновского излучения в режиме N40 (согласно ISO 4037 [6]) со средней энергией спектра 33 кэВ.

Часть серий облучения проводилась на имеющихся в ФБУН НИИРГ облучателях:

– в полях  $\beta$ -излучения источника  $Sr^{90}/Y^{90}$ . Однородность поля определялась помощью детекторов ДТГ-4. Определено, что поле однородное в пределах диаметра 8 см.

– на передвижной рентгенографической установке ПРДУ-02 (производство ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед») с также реализованным режимом N40 (согласно ISO 4037) со средней энергией спектра 33 кэВ.

При облучении все детекторы находились под слоем тканеэквивалентного материала толщиной 0,07 мм или 3 мм с использованием водного фантома (диаметр 9 см, высота 15 см) – для моделирования рассеяния, эквивалентного рассеянию от тела человека.

Перед облучением в поле источника ионизирующего излучения (ИИИ) для снятия остаточной информации все ТЛ-детекторы проходили термическую обработку в режимах, указанных изготовителями.

### Результаты и обсуждение

При выборе типа детекторов для проведения ИДК в зависимости от решаемой дозиметрической задачи необходимо знать сравнительные характеристики детекторов разных типов, т.е. однотипные характеристики, полученные в одинаковых условиях и на одном и том же приборе. Это связано прежде всего с тем, что значения характеристик детекторов во многом зависят от прибора, на котором они считываются. Также необходимо иметь в виду, что конкретные значения характеристик реальных партий детекторов либо не всегда известны, либо задаются в технических паспортах своими предельными значениями, которые они не превышают. Например, чувствительность детекторов в партии не указывается в технической документации, а коэффициент вариации задается максимальным значением, следовательно, тре-

буется экспериментально определять наиболее важные характеристики партий ТЛД разного типа.

Детекторы излучения должны моделировать энергопоглощение в чувствительных слоях ткани и отвечать следующим требованиям:

- тканеэквивалентность: соответствие эффективного атомного номера материала детектора  $Z_{\text{эфф}}$  эффективному атомному номеру мягкой биологической ткани (МБТ)  $Z_{\text{эфф}}(\text{МБТ})=7,4$ . Все имеющиеся детекторы тканеэквивалентны в диапазоне энергий свыше 100 кэВ, при меньших энергиях предполагается дополнительное исследование чувствительности;
- широкий диапазон регистрируемых доз фотонного и  $\beta$ -излучения во всем «практическом» диапазоне энергий;
- приемлемая для условий хронического и аварийного облучения погрешность измерения;
- автономность;
- удобство ношения на открытых участках кожи при выполнении производственных операций;
- многократность использования (в зависимости от стоимости).

#### ДТГ-4

Тканеэквивалентный материал с  $Z_{\text{эфф}} = 8,3$ .

После проведения серии облучений детекторов ДТГ-4 во ВНИИМ появилась возможность их калибровки в зависимости от типа излучения. В дальнейшем, в процессе собственных облучений величина образцовой дозы оценивалась по показаниям ДТГ-4 с введенными поправками в зависимости от типа излучения.

Ниже даются полученные результаты и их описание (табл. 1).

Из полученных данных видно, что значения  $H_p(0,07)$  для рентгеновского излучения с  $E_{\text{ср.}}=33$  кэВ завышены в среднем на 35%, а для излучения  $\text{Sr}^{90}/\text{Y}^{90}$  занижены в среднем на 29%.

Таким образом, при одновременном облучении детекторов ДТГ-4 и детекторов других типов мы можем определить величину образцовой дозы, сравнить с ней показания других детекторов и найти для них величины коэффициентов чувствительности.

Таблица 1

Чувствительность детекторов ДТГ-4 при различных типах и энергиях облучения

| Тип излучения,<br>энергия                                             | Детектор | K <sub>1</sub> , имп/мЗв | H <sub>p</sub> (0,07), мЗв                       | Образцовая доза<br>H <sub>p</sub> (0,07), мЗв | K <sub>2</sub> , имп/мЗв |
|-----------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------|
| Рентгеновское<br>излучение<br>E <sub>ср.</sub> =33 кэВ                | ДТГ-4    | 841                      | 2,43                                             | 1,617                                         | 1135                     |
|                                                                       |          |                          | 2,15                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,32                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 1,94                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,31                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,42                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,05                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,11                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 2,18                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 1,93                                             |                                               |                          |
| H <sub>p</sub> (0,07) <sub>ср.</sub> = 2,184±0,058                    |          |                          | Завышение на 35%                                 |                                               |                          |
| Sr <sup>90</sup> /Y <sup>90</sup><br>E <sub>ср.</sub> = 0,196/0,8 МэВ | ДТГ-4    | 841                      | 7,98                                             | 10                                            | 597                      |
|                                                                       |          |                          | 7,52                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 8,46                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 7,94                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 6,22                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 6,75                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 6,25                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 7,21                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | 5,75                                             |                                               |                          |
|                                                                       |          |                          | H <sub>p</sub> (0,07) <sub>ср.</sub> = 7,12±0,31 |                                               |                          |

$K_1$  – коэффициент чувствительности, используемый для расчета индивидуального эквивалента дозы  $H_p(10)$  при облучении в поле источника  $\text{Cs}^{137}$  (проверка во ВНИИМ),

$K_2$  – новый коэффициент чувствительности, полученный экспериментальным путем в зависимости от типа излучения.

Хотелось бы отметить, что детекторы ДТГ-4 на основе LiF (Mg, Ti) имеют толщину 100 мг/см<sup>2</sup>, что не соответствует требованиям НРБ-99/2009 и рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) – 5 мг/см<sup>2</sup>. При использовании таких «толстых» детекторов возможно измерить только усредненную дозу по слою кожи, которая соответствует толщине используемого детектора. В тех случаях, когда в спектре излучения присутствуют составляющие с малой или средней энергией β-излучения или низкоэнергетическое гамма-излучение, доза, измеренная с помощью этих детекторов, может оказаться заниженной в несколько раз по сравнению с образцовым значением дозы в критическом слое кожи толщиной в 5 мг/см<sup>2</sup>. Поэтому детекторы ДТГ-4 могут использоваться только как индикаторы наличия β-излучения или низкоэнергетического β-излучения.

#### ТЛД-1011(ТМ)

Тканеэквивалентный материал с  $Z_{эфф} = 8,3$ .

Облучение детекторов ТЛД-1011(ТМ) проводили во ВНИИМ в поле аттестованного источника слабопроникающего излучения  $Sr^{90}/Y^{90}$  (дозой 10 мЗв) и  $Pm^{147}$  (дозой 5 мЗв), затем были рассчитаны коэффициенты чувствительности отдельно для каждого детектора. Партия детекторов, которую мы использовали, была тестовой, разработчики пока не реализовали технологию для нанесения абсолютно одинакового слоя кристаллофосфора на рабочую поверхность, поэтому коэффициенты чувствительности необходимо было определить для каждого детектора отдельно, т.к. имеется сильная зависимость чувствительности от толщины кристаллофосфора. Чем слой толще, тем выше чувствительность и световыход детектора (табл. 2).

Кривая термовысвечивания детектора ТЛД-1011(ТМ) имеет 4 дозиметрических пика. Измеряемой величиной является светосумма после высвечивания низкотемпературного пика: сумма 3-го и 4-го пиков.

В соответствии с Госстандартом проверка дозиметров для измерения Нр (0,07) проводится только при облучении β-излучением от источника  $Sr^{90}/Y^{90}$ .

Таблица 2

#### Чувствительность детекторов ТЛД-1011 (ТМ) при различных энергиях облучения

| № детектора | Светосумма под пиком, имп $Sr^{90}/Y^{90}$ | Светосумма под пиком, имп $Pm^{147}$ | $K, \text{имп/мЗв } Sr^{90}/Y^{90}$ | $K, \text{имп/мЗв } Pm^{147}$ |
|-------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| 101         | 676                                        | 180                                  | 67,2                                | 36,0                          |
| 102         | 1037                                       | 225                                  | 103,7                               | 45,0                          |
| 103         | 1444                                       | 136                                  | 144,4                               | 27,2                          |
| 104         | 1488                                       | 443                                  | 148,8                               | 88,6                          |
| 105         | 810                                        | 71                                   | 81,0                                | 14,2                          |
| 106         | 1461                                       | 246                                  | 146,1                               | 49,2                          |
| 107         | 819                                        | 100                                  | 81,9                                | 20,0                          |
| 108         | 1402                                       | 639                                  | 140,2                               | 127,8                         |
| 109         | 962                                        | 66                                   | 96,2                                | 13,2                          |
| 110         | 1775                                       | 625                                  | 177,5                               | 125,0                         |
| 111         | 813                                        | 315                                  | 81,3                                | 63,0                          |
| 112         | 1992                                       | 336                                  | 199,2                               | 67,2                          |
| 113         | 755                                        | 94                                   | 75,5                                | 18,8                          |
| 114         | 1071                                       | 391                                  | 107,1                               | 78,2                          |

K – коэффициент чувствительности в зависимости от источника излучения.

Из приведенных данных наглядно видно, что для детекторов ТЛД-1011 (ТМ) имеется сильная зависимость чувствительности от энергии β-частиц ( $Sr^{90}/Y^{90}$  Еср.= 0,196/0,8 МэВ,  $Pm^{147}$  Еср.= 0,062 МэВ).

Спустя 3 месяца было проведено повторное облучение детекторов ТЛД-1011(ТМ) во ВНИИМ в поле источника β-излучения  $Sr^{90}/Y^{90}$  (дозой 10 мЗв). Результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

#### Чувствительность детекторов ТЛД-1011(ТМ) после 3 месяцев использования

| № детектора | Светосумма под пиком, имп $Sr^{90}/Y^{90}$ | $K_1, \text{имп/мЗв } Sr^{90}/Y^{90}$ | $K_2, \text{имп/мЗв } Sr^{90}/Y^{90}$ | $K_1/K_2, \text{отн.ед.}$               |
|-------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|
| 101         | 293                                        | 67,2                                  | 29,3                                  | 2,29                                    |
| 102         | 457                                        | 103,7                                 | 45,7                                  | 2,27                                    |
| 103         | 656                                        | 144,4                                 | 65,6                                  | 2,20                                    |
| 104         | 791                                        | 148,8                                 | 79,1                                  | 1,88                                    |
| 105         | 329                                        | 81,0                                  | 32,9                                  | 2,46                                    |
| 106         | 750                                        | 146,1                                 | 75,0                                  | 1,95                                    |
| 107         | 392                                        | 81,9                                  | 39,2                                  | 2,09                                    |
| 108         | 810                                        | 140,2                                 | 81,0                                  | 1,73                                    |
| 111         | 393                                        | 81,3                                  | 39,3                                  | 2,07                                    |
| 112         | 1060                                       | 199,2                                 | 106,0                                 | 1,88                                    |
| 113         | 311                                        | 75,5                                  | 31,1                                  | 2,43                                    |
|             |                                            |                                       |                                       | $(K_1/K_2) \text{ ср.} = 2,11 \pm 0,07$ |

$K_1$  – коэффициент чувствительности, который получился при калибровке детекторов при первичном облучении,  $K_2$  – коэффициент, получившийся спустя 3 месяца. Облучение и в том, и в другом случае было произведено дозой 10 мЗв.

Из приведенных данных видно, что с течением времени чувствительность детекторов снизилась в среднем в 2 раза.

Далее, с учетом новых коэффициентов  $K_2$ , определим чувствительность детекторов ТЛД-1011(ТМ) к рентгеновскому излучению (Еср.=33кэВ), образцовую дозу определяем по ДТГ-4 (3 мЗв), облучавшимся одновременно с ТЛД-1011(ТМ). Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

#### Чувствительность ТЛД-1011(ТМ) к рентгеновскому излучению

| № детектора | Светосумма под пиком, имп | $K_2, \text{имп/мЗв}$ | $H_p(0,07)_{\text{ТЛД-1011(ТМ)}}, \text{мЗв}$ | Образцовая доза $H_p(0,07)_{\text{ДТГ-4}}, \text{мЗв}$ |
|-------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 101         | 46                        | 29,30                 | 1,56                                          | 3,00                                                   |
| 102         | 94                        | 45,70                 | 2,06                                          |                                                        |
| 103         | 83                        | 65,60                 | 1,27                                          |                                                        |
| 105         | 67                        | 32,90                 | 2,04                                          |                                                        |
|             |                           |                       | $H_p(0,07) \text{ ср.} = 1,73 \pm 0,19$       | Необходима поправка + 42%                              |

$H_p(0,07)_{\text{ТЛД-1011(ТМ)}}$  – индивидуальный эквивалент дозы в коже рук, полученный с помощью детекторов ТЛД-1011 (ТМ).

В процессе изучения детекторов ТЛД-1011(ТМ) выяснилось, что дозу менее 2 мЗв они не регистрируют, хотя производителем заявлен диапазон измерения эквивалентной дозы излучения (область линейной зависимости) – 0,03–30000 мЗв. Для рентгеновского излучения полученные по показаниям ТЛД-1011 (ТМ) значения  $H_p(0,07)$  занижены в среднем на 42%.

Новые детекторы имеют недостаток, присущий в той или иной степени всем детекторам на основе LiF: Mg, Cu, P, – недопустимость длительного перегрева детектора свыше определенной температуры [7].

Детекторы (вместе с корпусами, разработанными в лаборатории радиационного контроля) были практически применены в одной из медицинских организаций г. Санкт-Петербурга, заметных неудобств при их использовании персоналом выявлено не было.

#### ДТВС-01

Тканезквивалентный материал с  $Z_{эфф} = 8,3$ .

Облучение происходило на передвижной рентгенографической установке ПРДУ-02 с реализованным режимом N40 (согласно ISO 4037). Так же детекторы облучались в поле источника  $\beta$ -излучения  $Sr^{90}/Y^{90}$ , по нему же происходила калибровка. Образцовая величина эквивалентной дозы  $H_p(0,07)$  определялась по детекторам ДТГ-4 с учетом поправок (см. табл. 1). Результаты измерения для детекторов ДТВС-01 приведены в таблице 5.

Из полученных данных можно сделать вывод, что результаты калибровки по  $Sr^{90}/Y^{90}$  согласуются с дальнейшим облучением на рентгеновской установке. Расхождение между образцовой дозой и полученной – не более 30%.

#### ТЛД-580

Тканезквивалентный материал с  $Z_{эфф} = 8,4$ .

Облучение детекторов ТЛД-580 производилось в составе дозиметров МКД-А ( $K = 403$  имп/мЗв) и МКД-Б ( $K = 129$  имп/мЗв) в полях источника  $\beta$ -излучения  $Sr^{90}/Y^{90}$ ,  $Cs^{137}$  и в режиме N40 (в рамках поверки во ВНИИМ).

Эквивалентная доза в коже оценивается:

– по показаниям первых двух детекторов (дозиметры МКД-А)

– по показаниям первого детектора (дозиметры МКД-Б)

Результаты приведены в таблице 6.

Из данных, приведенных в таблице 6, видно, что все полученные результаты для детекторов ТЛД-580, независимо от того, в составе какого дозиметра они находятся, хорошо согласуются с образцовыми значениями  $H_p(0,07)$  для всех типов излучений ( $\beta$ -, гамма-излучения и мягкий рентген 33кэВ).

При практическом внедрении данных детекторов в составе дозиметров МКД-Б в медицинских организациях г. Санкт-Петербурга от персонала последовал ряд нареканий: контактная лента имеет острые края и не прилегает вплотную к пальцу, что не позволяет использовать данные дозиметры во время проведения рабочих манипуляций, под перчатками. Надевать их снаружи не имеет смысла, т.к. они могут быть загрязнены радиоактивными веществами.

Так же имеется ряд практических недостатков:

– при сборке в пакет детекторы (4 шт.) и поглотители (6 шт.+фольга) сильно электризуются, что делает процесс сборки и разборки дозиметра весьма трудоемким.

– детекторы чувствительны к ультрафиолетовому излучению (даже при сборке в дозиметр влияние света очень заметно для дозиметра МКД-Б, корпус дозиметра МКД-А более «герметичен» для ультрафиолетового излучения), что существенно усложняет их применение для использования в мониторинге как окружающей среды, так и персонала.

#### Исследование дозовых характеристик детекторов для измерения индивидуального эквивалента дозы для хрусталика глаза $H_p(3)$

Для измерения индивидуального эквивалента дозы  $H_p(3)$  используется детектор – ДТГ-4. Коэффициент чувствительности  $K = 841$  имп/мЗв.

Облучение детекторов ДТГ-4 проводилось во ВНИИМ в поле источника  $\beta$ -излучения  $Sr^{90}/Y^{90}$ ,  $Cs^{137}$  и в режиме N40 в составе дозиметра МКД-А, т.е. на глубине 300 мг/см<sup>2</sup> (табл. 7), а также на рентгенографической установке ПРДУ-02 с реализованным режимом N40 под слоем тканезквивалентного материала толщиной 3 мм и без него (табл. 8).

Таблица 5

Чувствительность детекторов ДТВС-01 при различных энергиях и типах облучения

| № детектора | Тип излучения, энергия                                        | Светосумма под пиком, имп | Образцовая доза Н <sup>р</sup> (0,07) <sub>ДТГ-4</sub> , мЗв | К, имп/мЗв      | Н <sup>р</sup> (0,07) <sub>ДТВС-01</sub> , мЗв                |
|-------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|
| 1           | Sr <sup>90</sup> /Y <sup>90</sup><br>Е ср.= 0,196/<br>0,8 МэВ | 418                       | 6,60                                                         | 63,33           |                                                               |
| 2           |                                                               | 451                       |                                                              | 68,33           |                                                               |
| 3           |                                                               | 339                       |                                                              | 51,36           |                                                               |
| 4           |                                                               | 404                       |                                                              | 61,2            |                                                               |
| 5           |                                                               | 485                       |                                                              | 73,48           |                                                               |
|             |                                                               |                           |                                                              | Кср.=63,54±3,71 |                                                               |
| 1           | Рентгеновское излучение<br>Еср.=33кэВ                         | 185                       | 2,30                                                         | 63,54           | 2,91                                                          |
| 2           |                                                               | 181                       |                                                              | 63,54           | 2,84                                                          |
| 3           |                                                               | 169                       |                                                              | 63,54           | 2,66                                                          |
| 4           |                                                               | 170                       |                                                              | 63,54           | 2,68                                                          |
| 5           |                                                               | 179                       |                                                              | 63,54           | 2,82                                                          |
|             |                                                               |                           |                                                              |                 | (Н <sup>р</sup> (0,07) <sub>ДТВС-1</sub> )<br>ср. = 2,78±0,05 |

$H_p(0,07)_{ДТВС-01}$  – индивидуальный эквивалент дозы в коже рук, полученный с помощью детекторов ДТВС-01.

Таблица 6

Чувствительность детекторов ТТЛД-580 при различных энергиях и типах облучения

| № дозиметра | Тип излучения, энергия                                    | Показания детекторов в кассете с фильтрами, мЗв |                        | Н <sup>1</sup> р (0,07) – Нф(0,07), мЗв | Н <sup>0</sup> р(0,07), мЗв | Δ, % |
|-------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------|
|             |                                                           | Н <sup>1</sup> р(0,07)                          | Н <sup>2</sup> р(0,07) |                                         |                             |      |
| МКД-А       |                                                           |                                                 |                        |                                         |                             |      |
| 872         | Sr <sup>90</sup> /γ <sup>90</sup><br>Е ср.= 0,196/0,8 МэВ | 2,44                                            | 2,58                   | 2,02                                    | 2,0                         | 1    |
| 871         |                                                           | 2,9                                             | 3,67                   | 2,80                                    | 3,0                         | -7   |
| 876         |                                                           | 5,07                                            | 4,58                   | 4,34                                    | 5,0                         | -13  |
| 877         |                                                           | 6,48                                            | 6,24                   | 5,87                                    | 6,0                         | -2   |
| 887         |                                                           | 10,49                                           | 10,33                  | 9,68                                    | 10                          | -3   |
| 886         | Cs <sup>137</sup> Еср.= 660 кэВ                           | 8,85                                            | 11,00                  | 91,49                                   | 90                          | 2    |
| 879         |                                                           | 87,22                                           | 89,73                  |                                         |                             |      |
| 884         |                                                           | 93,12                                           | 97,88                  |                                         |                             |      |
| 856         | N40 Еср.= 33 кэВ                                          | 7,77                                            | 9,39                   | 8,14                                    | 10                          | -19  |
| 865         |                                                           | 7,33                                            | 10,04                  |                                         |                             |      |
| 868         | N40 Еср.= 33 кэВ                                          | 2,56                                            | 4,04                   | 2,81                                    | 1,93                        | 46   |
| 869         |                                                           | 2,39                                            | 3,35                   |                                         |                             |      |
| МКД-Б       |                                                           |                                                 |                        |                                         |                             |      |
| 121         | Sr90/γ90<br>Е ср.= 0,196/0,8 МэВ                          | 12,36                                           |                        |                                         | 10                          | 24   |
| 123         |                                                           | 12,49                                           |                        |                                         |                             | 25   |
| 164         |                                                           | 10,57                                           |                        |                                         |                             | 6    |
| 174         |                                                           | 13,62                                           |                        |                                         |                             | 36   |
| 177         |                                                           | 9,59                                            |                        |                                         |                             | -4   |
| 178         |                                                           | 9,00                                            |                        |                                         |                             | -10  |

Н<sub>ф</sub> (0,07) – показание фонового дозиметра;

Н<sup>0</sup><sub>р</sub> (0,07) – образцовая доза;

Н<sub>р</sub> (0,07) = (Н<sup>1</sup><sub>р</sub>(0,07) + Н<sup>2</sup><sub>р</sub>(0,07)) / 2 – Н<sub>ф</sub>(0,07);

Δ, % – погрешность измерения Н<sub>р</sub>(0,07).

Таблица 7

Чувствительность детекторов ДТГ-4 при измерении эквивалентной дозы хрусталика глаза при различных типах излучения

| № дозиметра | Тип излучения, энергия                                  | Показания детектора ДТГ-4 в корпусе МКД-А с фильтрами Н <sub>р</sub> (3), мЗв | Образцовая доза Н <sup>0</sup> <sub>р</sub> (0,07), мЗв | Н <sub>р</sub> (3)                 |
|-------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------|
|             |                                                         |                                                                               |                                                         | Н <sup>0</sup> <sub>р</sub> (0,07) |
| 872         | Sr <sup>90</sup> /Y <sup>90</sup><br>Еср.= 196 /0,8 МэВ | 0,46                                                                          | 2,0                                                     | 0,23                               |
| 871         |                                                         | 0,52                                                                          | 3,0                                                     | 0,17                               |
| 876         |                                                         | 1,20                                                                          | 5,0                                                     | 0,24                               |
| 877         |                                                         | 1,62                                                                          | 6,0                                                     | 0,27                               |
| 887         |                                                         | 2,59                                                                          | 10                                                      | 0,26                               |
| 886         | Cs <sup>137</sup><br>Еср.= 660 кэВ                      | 2,96                                                                          | 90                                                      | 0,30                               |
| 879         |                                                         | 22,40                                                                         |                                                         | 0,25                               |
| 884         |                                                         | 25,96                                                                         |                                                         | 0,29                               |
|             |                                                         |                                                                               |                                                         | Ср.зн.= 0,25 ±0,04                 |
| 856         | N40<br>Еср.= 33 кэВ                                     | 11,37                                                                         | 10                                                      | 1,14                               |
| 865         |                                                         | 13,46                                                                         | 1,93                                                    | 1,35                               |
| 868         |                                                         | 2,37                                                                          |                                                         | 1,23                               |
| 869         |                                                         | 3,03                                                                          | 2,11                                                    | 1,44                               |
|             |                                                         |                                                                               |                                                         | Ср.зн.= 1,29 ±0,07                 |

Таблица 8

Чувствительность детекторов ДТГ-4 при облучении рентгеновским излучением

| № дозиметра | Показания детекторов ДТГ-4 под слоем тканеэквивалентного вещества $h=3$ мм, $H^1$ , мЗв | Показания детекторов ДТГ-4 без тканеэквивалентного вещества $H^2$ , мЗв | $H^1/H^2$                                 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1           | 2,79                                                                                    | 2,49                                                                    | 1,12                                      |
| 2           | 2,72                                                                                    | 2,42                                                                    | 1,12                                      |
| 3           | 2,10                                                                                    | 1,83                                                                    | 1,15                                      |
| 4           | 2,49                                                                                    | 2,41                                                                    | 1,03                                      |
| 5           | 2,41                                                                                    | 2,71                                                                    | 0,89                                      |
|             |                                                                                         |                                                                         | $\langle H^1/H^2 \rangle = 1,06 \pm 0,05$ |

С помощью дозиметров МКД-А, по соотношению  $H^1(3)/H^0(0,07)$  мы можем так же определить, какой процент падающей дозы поглощается в покрывающем слое 300 мг/см<sup>2</sup>.

При расчете дозы от источника  $Sr^{90}/Y^{90}$  для детекторов ДТГ-4 использовался коэффициент чувствительности  $K = 597$  имп/мЗв (см. табл. 1).

При анализе полученных данных (см. табл. 7) можно сделать вывод, что при облучении хрусталика глаза  $\beta$ -излучением  $Sr^{90}/Y^{90}$  более 70% падающей дозы поглощается в слое 300 мг/см<sup>2</sup>, что не соответствует соотношению конверсионных коэффициентов, приведенным в таблице Е.3, ISO 12794:2000 [8], где  $H^1(3)/H^0(0,07) = 0,48$ . Таким образом, при измерении индивидуального эквивалента дозы от источника  $Sr^{90}/Y^{90}$  в хрусталике глаза с помощью дозиметра МКД-А погрешность измерения составит более 45%.

При облучении дозиметров МКД-А в полях гамма-излучения и мягкого рентгена (Еср. = 33 кэВ) ослабления не происходит (см. табл. 7, 8), что соответствует соотношению конверсионных коэффициентов, приведенных в таблице Е.2, ISO 12794:2000 [8].

При практическом внедрении данных детекторов (в составе дозиметров МКД-А) в медицинских организациях г. Санкт-Петербурга существенных замечаний по поводу неудобства их использования высказано не было.

### Выводы

Выполненное исследование детекторов для дозиметрии кожи рук и хрусталика глаза показало:

1. У детекторов ТЛД-1011(ТМ) чувствительность значительно падает с течением времени, следовательно, адекватная оценка доз облучения кожи рук может быть выполнена только стабильными во времени детекторами и при наличии информации о виде и энергии действующего на кожу излучения.

2. Оценка доз облучения хрусталика глаза в полях фотонного излучения, выполняемая на основании измерений величины индивидуального эквивалента дозы в хрусталике глаза ( $H^1(3)$ ) специально для этого предназначенными дозиметрами, является приемлемой. Погрешность измерения в среднем не более 25%, для области энергии 33 кэВ наблюдается завышение результатов в среднем на 35%.

3. Чувствительность дозиметров для измерения индивидуального эквивалента дозы в хрусталике ( $H^1(3)$ ) при облучении  $\beta$ -излучением не соответствует требованию международного стандарта ISO 12794:2000. Таким образом, возможность применения дозиметров МКД-А для

измерения  $H^1(3)$  в полях  $\beta$ - и смешанного излучения требует дальнейших исследований.

4. На данный момент наиболее перспективным детектором для контроля за эквивалентной дозой облучения кожи рук является тонкий детектор ДТВС-01 на основе LiF (Mg,Ti). Данный термоллюминофор является тканеэквивалентным, прост в использовании, имеет хорошую чувствительность к  $\beta$ -излучению и мягкому рентгену, стабилен во времени. Дозиметрия в смешанных полях таким детектором возможна, что и требуется для целей дозиметрии кожи.

5. После проведения ряда практических исследований в медицинских учреждениях г. Санкт-Петербурга стало очевидно, что дозиметры, располагающиеся на внутренней стороне ладоней, должны быть эргономичными (тонкие, гибкие) и не мешать работе персонала, т.е., помимо вопроса создания подходящего термоллюминофора, также важна тщательная проработка корпуса дозиметра.

### Литература

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) : санитарные правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09): утв. и введены в действие от 07.07.09г. – М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
2. Гимадова, Т.И. Индивидуальные дозиметры для измерения эквивалентных доз в коже пальцев рук, лица и хрусталике глаза при хроническом и аварийном облучении / Т.И. Гимадова, А.И. Шакс // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2001. – № 3. – С. 21–27.
3. Оценка профессионального облучения вследствие поступления радионуклидов : руководство по безопасности – Вена: МАГАТЭ, 1999. – № RS-G-1.2. – С. 87.
4. Радиационная защита при профессиональном облучении. Руководство по безопасности. – Вена: МАГАТЭ, 1999. – № RS-G-1.1. – С. 78.
5. Контроль эквивалентных доз фотонного и бета-излучения в коже и хрусталике глаза. Методические указания (МУ 2.6.1.56-2002). – М.: Минздрав России, 2002.
6. ISO 4037-1: 2006, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose-rate meters and for determining their response as a function of photon energy. – Part 1: Radiation characteristics and production methods.
7. Агриненко, С.Д. Разработка комплекса дозиметрического контроля на основе детекторов LiF: Mg, Cu, P при облучении с PAO : автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.Д. Агриненко. –
8. ISO 12794:2000, Nuclear energy – Radiation protection – Individual thermoluminescence dosimeters for extremities and eyes.

Шлеенкова Е.Н.  
Тел.: (812)2334283

Поступила: 10.11.2014 г.