

КАЛИБРОВКА ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДОЗИМЕТРОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПУЧКАХ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО КАЧЕСТВА

И.Д. Уханов¹, И.М. Лебедеенко^{1,2}

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

Цель: Описать технологию дозиметрической подготовки одной и той же партии ТЛД на основе LiF, активированного магнием Mg и титаном Ti (LiF:Mg-Ti), для пучков фотонного излучения трех качеств со средними энергиями 1,25 МэВ, 2 МэВ (номинальная энергия 6 МВ) и пучка ¹⁹²Ir с энергией 0,38 МэВ для проведения измерений при лучевой терапии онкологических больных. Технологию калибровки ТЛД для ¹⁹²Ir разработать заново. Сопоставить энергетические зависимости коэффициентов чувствительности для пучков различных качеств.

Материал и методы: 175 дозиметров облучались в пучках фотонного излучения с энергией 2 МэВ, 1,25 МэВ и 0,38 МэВ в воспроизводимой геометрии несколько раз определенной одинаковой дозой. Получены индивидуальные коэффициенты чувствительности. Отобрана рабочая партия из 12 ТЛД с погрешностью воспроизводимости показаний 2 %. Для партии оценены индивидуальные коэффициенты и построены графики энергетической зависимости коэффициентов индивидуальной чувствительности.

Результаты: Полученные результаты свидетельствуют о наличии энергетической зависимости индивидуальных коэффициентов чувствительности ТЛД в диапазоне энергий от 0,38 до 1,0 МэВ. После проведения калибровочных процедур возможно применение одной и той рабочей партии ТЛД для различных качеств пучков.

Ключевые слова: термолюминесцентные дозиметры, калибровка, лучевая терапия, индивидуальные коэффициенты чувствительности

DOI: 10.52775/1810-200X-2023-98-2-114-124

От авторов

Так как у специалистов возобновился интерес к ТЛД, о чем свидетельствуют выступления на секции медицинской физики на VI Всероссийском научно-образовательном конгрессе в 10–12 февраля 2023 г., мы делимся своим опытом работы с ТЛД. Предлагаемая статья носит методический характер и предназначена для медицинских физиков, желающих приобрести опыт работы с термолюминесцентными дозиметрами и освоить трудоемкий процесс их подготовки для применения в экспериментальной и *in vivo* дозиметрии.

Введение

Современные средства контроля дозы в процессе лучевой терапии (ЛТ) получили серьезное развитие за последнее десятилетие. Это средства предтерапевтической верификации планов облучения с помощью специальных матриц, средства получения изображений и их оцифровка с помощью средств портальной визуализации в мегавольтном пучке в процессе проведения сеанса облучения и другие. Тем не менее, ни одно из средств не позволяет получить поточечную информацию о дозе в интере-

сующей нас области как в процессе проведения экспериментальных работ и отработке методик облучения, так и при *in vivo* дозиметрии. Поэтому использование термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) по-прежнему актуально и в сегодняшних условиях [4–7].

Дозиметрия с применением термолюминесцентных дозиметров (ТЛД) удобна для применения в клинической практике ЛТ благодаря наличию надежных материалов детекторов и автоматических считывающих показания систем. Термолюминесцентные детекторы обладают высокой чувствительностью при малых габаритах. Работа с ТЛД осуществляется без электрометра и без громоздких кабелей [1].

Цель: Описать технологию дозиметрической подготовки одной и той же партии ТЛД на основе LiF, активированного магнием Mg и титаном Ti (LiF:Mg-Ti), для пучков фотонного излучения трех качеств с энергиями 1,25 МэВ, 2 МэВ и пучка ^{192}Ir с энергией 0,38 МэВ для проведения измерений при лучевой терапии онкологических больных. Технологию калибровки ТЛД для ^{192}Ir разработать с нуля. Сопоставить калибровочные характеристики для различных качеств пучков.

Общие сведения. Основы метода

ТЛД базируется на способности кристаллов, имеющих дефекты, улавливать и запасать информацию об энергии ионизирующего излучения, которая высвобождается при последующем нагреве в виде испускания электромагнитного излучения, в основном в видимой области спектра. Испускаемый свет улавливается с помощью фотоумножителя (ФЭУ), его интенсивность пропорциональна дозе, поглощенной в материале ТЛД [1, 2].

При облучении ТЛД образуются свободные электроны и дырки. И те и другие могут свободно перемещаться в зоне проводимости в течение короткого времени. В конце концов, они могут быть захвачены дефектами кристалла, или переходить в валентную зону и рекомбинировать с дырками с испусканием или без испускания света. Информацию о накопленной энергии можно получить путем нагревания кристалла до определенной температуры, зависящей от его природы. Энергия нагревания используется для извлечения электронов из ловушек в зону проводимости, где они могут свободно перемещаться, пока не провзаимодействуют одним из трех возможных способов. ТЛ сигнал, как функция температуры или времени

нагревания, если этот параметр пропорционален температуре, зависит от природы кристалла и называется кривой термолюминесценции. Он содержит различные пики, каждый пик соответствует различному энергетическому состоянию в кристалле. Пики могут быть нестабильными, затухающими со временем, в зависимости от материала ТЛД, или стабильными. ТЛ дозиметры всегда имеют как стабильный, так и нестабильный пики, один из которых используется в дальнейшем при дозиметрии. Они называются *дозиметрическими пиками*.

Твердые ТЛ дозиметры

Большинство наиболее часто используемых твердых ТЛД получены путем добавления фосфоров (светящихся веществ), таких, как фторид лития (LiF), борат лития, сульфат кальция (CaSO_4) и фторид кальция (CaF_2), с примесями, которые называют “активаторами”. Например, LiF:Mg-Ti – это фторид лития с добавлением магния и титана, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{:Cu}$ – это борат лития с добавлением меди, и т.д. Следует отметить, что характеристики дозиметров из чистого фосфора могут значительно отличаться от характеристик с использованием композитных материалов [1, 2].

Материал и методы

Идентификация дозиметров. Получение индивидуальных коэффициентов

ТЛ дозиметры отличаются по чувствительности. Под чувствительностью подразумевается коэффициент преобразования выхода термолюминесценции детекторов в накопленную дозу. Наилучший способ идентификации дозиметров состоит в получении индивидуальных коэффициентов. Для этого в первом (всего их три) эксперименте 175 дозиметров облучались в пучке тормозного излучения с номинальной энергией 6 МэВ полем 25×25 см в воспроизводимой геометрии 6 раз одинаковой дозой 2 Гр. Затем показания ТЛД считывались на анализаторе. Для каждого из них рассчитывался индивидуальный коэффициент чувствительности в виде индивидуального коэффициента S_i :

$$S_i = R_i/R'$$

где R_i – показания i -го дозиметра, а R' – усредненное показание за 6 измерений для данного дозиметра. Полученный коэффициент показывает отклонение отклика каждого дозиметра относительно его среднего значения.

Собственная точность ТЛД – это воспроизводимость показаний данного ТЛ материала, связанная с данной считывающей системой. Она сильно зависит от качества используемого материала, характеристик считывателя, пути предварительного и полного нагревания, чистоты азота в считывающей камере и т.д. После первой процедуры считывания и отжига, эту операцию повторяли 6 раз, то есть после каждого облучения исходной партии [1, 2]. Стандартное отклонение показаний ТЛД должно составлять $\pm 2\%$ или меньше. ТЛ детекторы, имеющие стандартное отклонение от среднего значения по партии за все 6 раз измерений больше, чем $\pm 2\%$, выбывали из партии. Отобранная партия ТЛД составила нашу рабочую группу и состояла из 12 ТЛД.

Калибровка термолюминесцентных дозиметров. Индивидуальные коэффициенты чувствительности

Методы калибровки ТЛД для *in vivo* дозиметрии в терапевтическом пучке фотонного излучения основаны на сопоставлении данных ТЛД с данными референсной ионизационной камеры ИК. Измерения проводятся для ТЛД и ИК в твердом фантоме в одной и той же геометрии и условиях. Итоговое значение показаний ТЛД в единицах поглощенной дозы находится путем умножения показаний ТЛД на анализаторе на индивидуальный коэффициент и коэффициент калибровки.

Описание анализатора дозы Victoreen 2800M и его технические данные

Работа проводилась с термолюминесцентными дозиметрами на основе LiF:Mg-Ti – фторида лития с добавлением магния и титана. Размер ТЛД цилиндрической формы составлял $\varnothing 1 \text{ мм} \times 8 \text{ мм}$. Анализатор дозы Victoreen 2800M (Германия) предназначен для считывания показаний с ТЛД различной формы, в том числе цилиндрической, с установкой параметров температурного режима высвечивания показаний с ТЛД на основе LiF:Mg-Ti. Предварительное нагревание ТЛД составляло 100°C . Шаг возрастания температуры $10^\circ\text{C}/\text{с}$. Максимальная температура нагревания ТЛД в режиме сте-

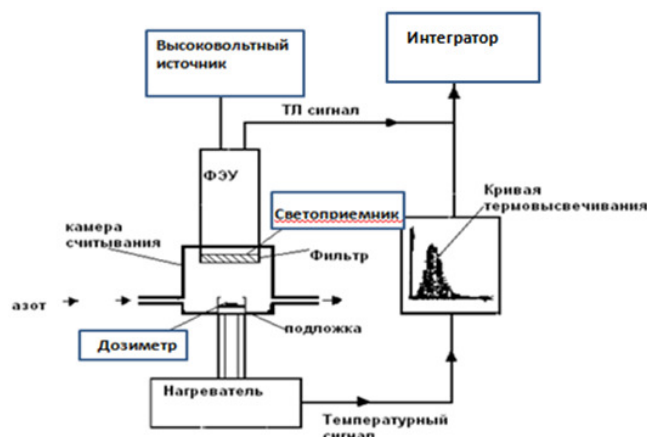


Рис. 1. Типичная блок-схема работы анализатора

рилизации 400°C . Время считывания показаний 30 с. Фотоэлектронный умножитель ФЭУ, используемый в модели 2800M, имеет низкий темновой ток $I < 20 \text{ пА}$ при 25°C . Считывание показаний в анализаторе может осуществляться в единицах заряда, в рентгенах или единицах поглощенной дозы Гр.

Принцип работы устройства для считывания показаний, или анализатора, показан на рис. 1. Облученные дозиметры располагались на металлической подложке, находящейся внутри считывающей камеры. Подставка нагревалась различными способами до двух различных температур: температура предварительного нагрева применялась для удаления нестабильных пиков, а рабочая температура использовалась для снятия информации с дозиметрических пиков. Температура подставки измерялась термопарой, находящейся с ней в термическом контакте. Свет, испускаемый нагретым материалом, перед тем, как попасть на ФЭУ, проходит через один или несколько оптических фильтров. Ток ФЭУ пропорционален световому потоку, и, следовательно, поглощенной дозе, запасенной в ТЛ дозиметре [1].

В зависимости от типа считывающей системы, каждый сигнал, пропорциональный световому потоку, усиливался и проходил через интегратор (режим постоянного тока). Ток ФЭУ пропорционален световому потоку, и, следовательно, поглощенной дозе, запасенной в ТЛ дозиметре. Для окончательной оценки накопленной ТЛД дозы в сГр необходимо найти произведение двух величин: индивидуального коэффициента S'_y (нКл) и индивидуального коэффициента чувствительности с размерностью K_i (сГр/нКл).

Результаты

Определение индивидуальных коэффициентов ТЛД в пучке тормозного излучения с номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ

Для определения индивидуальных коэффициентов партия детекторов из 175 штук 6 раз была облучена на ускорителе электронов Clinac iX фотонным пучком с номинальной энергией 6 МэВ. Условия облучения: РИП=100 см, S=25×25 см. При этом детекторы помещались в трех миниатюрных тканеэквивалентных фантомах и одновременно укладывались на терапевтический стол ускорителя плотно друг к другу в зоне равномерного облучения. Перед каждым облучением партия отжигалась. После облучения и предварительного отжига показания детекторов считывались на анализаторе дозы Victoreen 2800M.

Показания детекторов считывались в мкКл и приведены в табл. 1, в которой приняты следующие обозначения: Q_{ij} – показания ТЛД в мкКл, Q' – усредненное значение показаний анализатора для одной серии измерений (приведено в конце таблицы), $Q_{ик}$ – значения заряда (нКл), собранного ФЭУ при облучении ТЛД в одинаковых условиях с ИК. Табл. 1 приведена в прерванном варианте. Это дает возможность показать входные параметры для расчета индивидуального коэффициента, что необходимо для практикующего физика, обозначить порядок считываемых величин и в то же время не загромождать пространство публикации. На основании каждой серии измерений (по вертикали) рассчитывается коэффициент:

$$S_i = (Q_i - Q_0) / (Q' - Q_0), \quad (1)$$

Таблица 1
Показания ТЛД анализатора Q_{ij} (мкКл)

i \ j	Q _{i1}	Q _{i2}	Q _{i3}	Q _{i4}	Q _{i5}	Q _{i6}	Q _{ик}
1	1,138	1,132	1,129	1,093	1,104	1,068	0,992
2	1,002	1,044	1,037	1,021	0,99	0,987	1,09
3	1,151	1,228	1,179	1,165	1,122	1,101	1,249
4	1,153	1,216	1,195	1,200	1,141	1,145	1,283
5	1,024	1,065	1,051	1,060	1,028	1,029	1,136
6	1,081	1,147	1,15	1,165	1,079	1,095	1,199
7	1,124	1,179	1,14	1,119	1,109	1,101	1,216
8	1,138	1,206	1,193	1,149	1,148	1,09	1,189
.....							
174	1,177	1,226	1,157	1,066	1,155	1,137	1,145
175	1,164	1,185	1,103	1,074	1,146	1,103	1,108
Q'	1,119701	1,124506	1,118989	1,100747	1,09542	1,068241	

где Q_0 – усредненное значение фона, S_i показывает отклонение отклика каждого детектора Q_i относительно среднего значения Q' по группе ТЛД. Фоновые показания не превышают нескольких пКл, поэтому для удобства и быстроты расчетов его можно не учитывать.

Тогда формула (1) приобретает вид:

$$S_i = Q_i / Q'. \quad (2)$$

Индивидуальный коэффициент S'_j для каждого ТЛД рассчитывается из среднего для всех значений коэффициента S_i по всем шести измерениям: $S_{i1} \dots S_{i6}$ или, в общем виде:

$$S'_j = 1 / n \sum_j S_{ij}, \quad (3)$$

где $j=1 \dots n$, $n=6$ (номер измерения), $i=1 \dots m$, $m=175$ (номер детектора).

Среднеквадратичное отклонение значения S'_j от среднего по группе рассчитывается в виде:

$$\delta S_j = \sqrt{\sum_j [(S'_j - S_j)^2 / n(n-1)]^{1/2}}. \quad (4)$$

Индивидуальные рассчитанные коэффициенты S_i и среднеквадратичное отклонение приведены в табл. 2.

Из общей партии детекторов на основании данных среднеквадратичного отклонения δS_j была сформирована рабочая партия детекторов. Она включала детекторы с разбросом показаний 2 % (табл. 3) и состояла из 12 штук.

Калибровка ТЛД. Индивидуальные коэффициенты чувствительности в пучке тормозного излучения с номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ

Для нахождения индивидуальных коэффициентов чувствительности были проведены измерения в тканеэквивалентном фантоме

Таблица 2
Значения индивидуальных коэффициентов S_j , S'_j и среднеквадратичного отклонения δS_j

i \ j	S _{i1}	S _{i2}	S _{i3}	S _{i4}	S _{i5}	S _{i6}	S _{ij} '	δS _{ij}
1	1,016	1,006	1,008	0,992	1,007	0,999	1,005	0,008
2	0,894	0,928	0,926	0,927	0,903	0,923	0,918	0,014
3	1,027	1,092	1,053	1,058	1,024	1,030	1,048	0,025
4	1,029	1,081	1,067	1,090	1,041	1,071	1,064	0,023
5	0,914	0,947	0,939	0,962	0,938	0,963	0,944	0,018
6	0,965	1,020	1,027	1,058	0,985	1,025	1,014	0,033
7	1,003	1,048	1,018	1,016	1,012	1,030	1,022	0,015
8	1,016	1,072	1,066	1,043	1,048	1,020	1,045	0,022
.....								
174	1,051	1,090	1,033	0,968	1,054	1,064	1,044	0,041
175	1,039	1,053	0,985	0,975	1,046	1,032	1,022	0,033

Таблица 3

Значения индивидуальных коэффициентов S_{ij}' , среднеквадратичные отклонения и значения индивидуальных коэффициентов чувствительности ТЛД для 6 МэВ

№ ТЛД	5	14	27	28	45	76	92	96	104	105	127	66
K_i	0,191	0,179	0,184	0,177	0,187	0,192	0,196	0,172	0,178	0,183	0,196	0,193
S_{ij}'	0,944	1,018	1,039	1,046	1,022	0,956	0,995	1,008	1,034	0,996	0,982	1,019
δS	0,020	0,008	0,016	0,006	0,011	0,012	0,014	0,009	0,021	0,009	0,014	0,035

“твердая вода”. Показания ТЛД сопоставлены с показаниями эталонной ионизационной камеры ИК. Условия измерений: РИП=100 см; размер $S=25 \times 25$ см на уровне изоцентра. Для измерений использовали плоскопараллельную ионизационную камеру типа NA-30-01 (Швеция) с толщиной передней стенки эквивалентной 1 мм воды. Измерения проводились на ускорителе электронов Clinac iX в пучке фотонного излучения с номинальной энергией 6 МэВ. При этом ИК и ТЛД размещаются на одной и той же глубине и одних и тех же условиях. Поглощенную дозу D для ИК вычисляли в соответствии с протоколом TRS 398 и выражением:

$$D = M_G \times N_{d,w,G_0} \times k_{G_0}, \quad (5)$$

где M_G – показания дозиметра, откорректированные на температуру и давление, калибровку электрометра, эффект полярности и ионную рекомбинацию, N_{d,w,G_0} – калибровочный коэффициент дозиметра в единицах поглощенной дозы для опорного качества Q_0 , коэффициент k_{G_0} вносит поправку на различие между стандартным качеством пучка Q_0 и пучком пользователя качества Q . При этом показание дозиметра M_G скорректировано на стандартные значения влияющих величин, для которых калибровочный коэффициент является правильным, а именно, с учетом поправки на полярность, рекомбинацию, температуру и давление.

Показания ИК сопоставлены с показаниями ТЛД. Индивидуальный коэффициент чувствительности для каждого детектора вычислялся как отношение:

$$K_i = D/Q_i \text{ [сГр/нКл]}, \quad (6)$$

где Q_i – значение показаний ТЛД в единицах заряда (нКл). В табл. 3 приведены индивидуальные коэффициенты S_{ij}' и индивидуальные коэффициенты чувствительности K_i для группы детекторов с воспроизводимостью до 2 %

(воспроизводимость отражает погрешность измерения) в зависимости от номера детектора.

Калибровка ТЛД. Индивидуальные коэффициенты чувствительности в пучке гамма-излучения с номинальной энергией 1,25 МэВ источника ^{60}Co

Методика облучения ТЛД в пучке излучения гамма-терапевтического аппарата для дистанционной гамма терапии “Рокус АМ” (работает в экспериментальном режиме) с источником ^{60}Co практически полностью повторяет методику калибровки ТЛД в пучке тормозного излучения медицинского ускорителя. Особенностью проведения измерений на данном аппарате являлась необходимость учета поправки на распад источника ^{60}Co в течение трех недель облучения.

Для проведения эксперимента была выбрана готовая партия из 12 детекторов первой рабочей партии с воспроизводимостью не более 2 % для фотонного пучка с энергией 6 МэВ (табл. 3). Мы сочли обоснованным использовать готовую отобранную партию, поскольку вся партия ТЛД по этому параметру отбиралась на заводе для широкого диапазона энергий.

Определение индивидуальных коэффициентов для ^{60}Co

Для определения индивидуальных коэффициентов каждого ТЛД провели серию из 5 одинаковых облучений отобранных 12 ТЛД. Условия облучения РИП=100 см, размер поля $S=22 \times 22$ см. Облученные ТЛД отжигали и высвечивали на анализаторе дозы Victoreen 2800M. С учетом продолжительности эксперимента вводилась поправка на распад источника ^{60}Co , 1 % в месяц. Данные поэтапно сводились в таблицы.

Таблица 4

Значения индивидуальных коэффициентов S_{ij}' , среднеквадратичные отклонения и значения индивидуальных коэффициентов чувствительности ТЛД для ^{60}Co

№ ТЛД	5	14	27	28	45	76	92	96	104	105	127	66
K_i	0,196	0,181	0,176	0,177	0,173	0,187	0,175	0,180	0,174	0,178	0,186	0,168
S_{ij}'	0,921	0,994	1,006	1,030	1,019	0,944	1,011	1,019	1,04	1,006	0,966	1,046
δS	0,020	0,008	0,016	0,006	0,011	0,012	0,014	0,009	0,021	0,009	0,014	0,02

Нахождение индивидуальных коэффициентов чувствительности

Таким образом, индивидуальные коэффициенты ТЛД определялись только для партии из 12 штук. Для оценки индивидуальных коэффициентов чувствительности отобранные ТЛД и эталонная ИК были облучены одной и той же дозой в идентичных условиях. Условия облучения: расстояние источник–поверхность фантома РИП=75 см, расстояние источник камера РИК=80 см, размер поля $S=22 \times 22$ см. Для калибровки ТЛД применена ИК цилиндрического типа объемом $0,6 \text{ см}^3$ производства РТВ. Поглощенную дозу D для ИК вычисляли в соответствии с протоколом TRS 398. Коэффициенты индивидуальной чувствительности для каждого детектора $K_i = D / Q_{ик}$ (сГр/нКл) приведены в табл. 4, где S_{ij}' – значение индивидуального коэффициента для данного ТЛД, δS – среднеквадратичное отклонение не более 2 %.

Калибровка ТЛД. Индивидуальные коэффициенты чувствительности в пучке излучения радионуклида ^{192}Ir со средней энергией фотонного излучения 0,38 МэВ внутриполостного аппарата

Одним из необходимых условий определения коэффициента чувствительности каждого из 12 отобранных ТЛД являлась полная идентичность условий облучения ТЛД и эталонной ИК. Для проведения калибровки на внутриполостном аппарате разработана собственная оригинальная методика, отличная от методики калибровки на дистанционных аппаратах. При этом использовался цилиндрический акриловый фантом, предназначенный для работы с аппаратами контактной лучевой терапии.

Облучение ТЛД с ИК осуществлялось в следующей последовательности:

1. Электронный дозиметр в комплекте с цилиндрической ИК производства РТВ объемом $0,6 \text{ см}^3$ включен и прогрет.

2. ИК установлена по центру цилиндрического фантома типа Т9193 в адаптер для камеры данного типа (рис. 2).
3. Эндостат источника устанавливался в соответствующий адаптер бокового гнезда того же фантома. В фантоме расстояние между осями бокового и центрального отверстия составляло 8 см (рис. 2). Поскольку источник представляет собой капсулу, активная часть которой несколько мм, его можно считать точечным и собственными размерами пренебречь. Так, для расстояния в 8 см мы имеем достаточно большой, почти до нуля, спад дозы. Исходя из типичного графика спада дозы такого источника, общее время стояния источника в позиции выбиралось так, чтобы поглощенная доза ИК составила около 2 сГр, то есть за пределами высокого градиента, но и ненулевого значения.
4. После задания позиций и времени стояния, источник выводился из хранилища. Путем замеров определены показания ИК, соответствующие максимальному значению дозы



Рис. 2. Цилиндрический фантом с адаптерами (рядом) для ИК и эндостатов. По периметру отверстия для установки адаптеров эндостатов источников

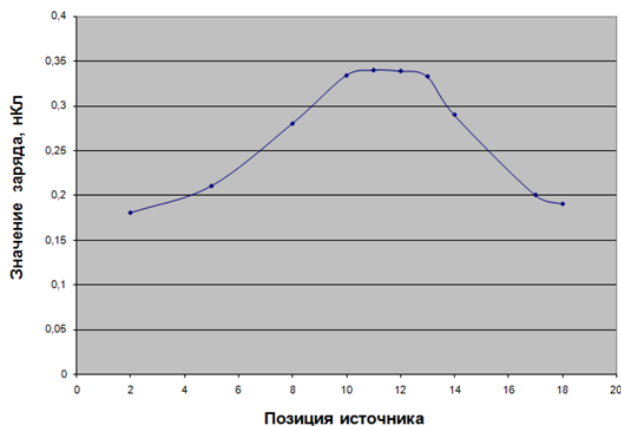


Рис. 3. Зависимость значения заряда ИК (нКл) от номера позиции стояния источника

(“плато”) для всего перечня из 19 позиций источника. Выбраны позиции источника 10, 11, 12, (рис. 3), которые находятся на том же расстоянии от нижнего края адаптера, что и чувствительный объем камеры.

- Далее необходимо было найти на дне адаптера такое место для ИК, которое бы соответствовало одной из этих позиций. Для этого определили, на каком расстоянии от края адаптера находятся соответствующие позиции стояния источника, и перенесли их на адаптер для ИК (рис. 4).
- Для регистрации положения источника относительно края адаптера вдоль оси, в выбранной позиции, например 11, использована стандартная линейка внутритростного аппарата. Линейка представляет собой прозрачный эндостат с нанесенными делениями так, чтобы можно было визуально определить расстояние от конца эндостата до источника. Таким образом, определяется положение источника в данной позиции.



Рис. 4. Адаптер с ИК. Фото слева и схема справа

Положение источника регистрировалось при его выходе по видеомонитору в пультовой. Для позиции 11, например, оно соответствовало 5,5 см. Полученное значение позиции источника перенесено с линейки на адаптер ИК (рис. 5а слева).

- Таким образом, установлено, что при расположении ТЛД на дне адаптера ионизационной камеры для 10-й позиции источника дозы, поглощенные за одно и тоже время в обоих регистрирующих устройствах, должны быть одинаковы.

Определение индивидуальных коэффициентов для ^{192}Ir

Для определения индивидуальных коэффициентов 12 отобранных ТЛД облучали одной и той же дозой и высвечивали, процедура повторялась 5 раз, данные заносились в таблицы и обрабатывались.

Последовательное облучение ТЛД

Каждый из 12 ТЛД последовательно помещался на дно адаптера для ИК и облучался (рис. 5б). ТЛД были упакованы в пронумерованные тканеэквивалентные капсулы. Капсула помещалась в отверстие адаптера довольно плотно, таким образом, исключалась воздушная прослойка между материалом ТЛД и стенками адаптера. Калибровка ТЛД осуществлялась в следующей последовательности. ИК или ТЛД вставлялись в адаптеры, адаптеры вставля-



Рис. 5. Нанесение отметок о положении источника в боковом гнезде адаптера ИК – а, ТЛД в капсуле на дне гнезда адаптера в положении, соответствующем выбранному положению источника – б

Таблица 5

Значения индивидуальных коэффициентов S_{ij}' , среднеквадратичные отклонения δS и значения индивидуальных коэффициентов чувствительности K_i ТЛД для ^{192}Ir

№ ТЛД	5	14	27	28	45	76	92	96	104	105	127	66
K_i	0,172	0,161	0,161	0,160	0,161	0,176	0,157	0,162	0,153	0,166	0,167	0,143
S_{ij}'	0,906	1,005	1,016	1,016	1,009	0,959	1,016	1,016	1,049	1,006	0,965	1,038
δS	0,014	0,017	0,025	0,014	0,027	0,022	0,024	0,021	0,030	0,025	0,018	0,015

лись в соответствующие гнезда цилиндрического фантома. Далее эндостат устанавливался в соответствующее гнездо фантома, а проводящая трубка источника одним концом подсоединялась к эндостату, а другим к одному каналу аппарата. Время измерения для каждого ТЛД составляло 10 с.

Определение индивидуальных коэффициентов чувствительности

Поглощенная доза в ИК вычислялась в соответствии с протоколом TRS 398 по формуле (5).

Для нахождения индивидуальных коэффициентов ТЛД облучались 5 раз в пучке γ -излучения ^{192}Ir . Значения индивидуальных коэффициентов, среднеквадратичных отклонений и коэффициентов чувствительности приведены в табл. 5. В табл. 5: $S=1/n \sum S$ – значение индивидуального коэффициента для данного ТЛД, $\delta S = \Sigma[(S-S)/n(n-1)]^{1/2}$ – среднеквадратичное отклонение величины S или собственно погрешность ТЛД, $S=Q/Q'$ – отношение показаний анализатора к усредненной величине показаний для данной серии измерений.

Сопоставление индивидуальных коэффициентов для пучков разных качеств фотонного излучения с номинальными энергиями 6 МэВ (средняя 2 МэВ), 1,25 МэВ (^{60}Co) и 0,4 МэВ (^{192}Ir)

Завершающим этапом работы являлось нахождение зависимости индивидуальных коэффициентов и коэффициентов чувствительности от энергии излучения, другими словами, нахождение энергетической зависимости чувствительности ТЛД. Данные о зависимости индивидуальных коэффициентов и коэффициентов чувствительности от энергии приведены в табл. 6, 7 и рис. 6–8.

Обсуждение

Сам по себе индивидуальный коэффициент (рис. 6) вводится для корректировки показаний данного ТЛД на воспроизводимость. При умножении значения, полученного на анализаторе, на этот коэффициент, мы усредняем это значение по группе из 12 ТЛД. При умножении усредненного по группе значения на коэффициент чувствительности данного ТЛД, мы

Таблица 6

Зависимость индивидуального коэффициента ТЛД от средней энергии пучка излучения

№ ТЛД	Энергия, МэВ	0,38	1,25	6,00
5		0,906±0,014	0,921±0,025	0,944±0,018
14		1,005±0,017	0,994±0,008	1,018±0,011
27		1,016±0,025	1,006±0,016	1,039±0,012
28		1,016±0,014	1,030±0,006	1,046±0,017
45		1,009±0,027	1,019±0,011	1,022±0,009
76		0,959±0,022	0,944±0,012	0,956±0,012
92		1,016±0,024	1,011±0,014	0,995±0,011
96		1,016±0,021	1,019±0,009	1,008±0,012
104		1,049±0,030	1,040±0,022	1,034±0,011
105		1,006±0,025	1,006±0,009	0,996±0,016
127		0,965±0,018	0,966±0,014	0,982±0,022
66		1,038±0,015	1,046±0,020	1,019±0,035

Таблица 7

Зависимость коэффициента чувствительности ТЛД от средней энергии пучка излучения

№ ТЛД	Энергия, МэВ	0,38	1,25	6,00
5		0,172	0,196	0,191
14		0,161	0,181	0,179
27		0,161	0,176	0,184
28		0,160	0,177	0,177
45		0,161	0,173	0,187
76		0,176	0,187	0,192
92		0,157	0,175	0,196
96		0,162	0,180	0,172
104		0,153	0,174	0,178
105		0,166	0,178	0,183
127		0,167	0,186	0,196
66		0,143	0,168	0,193

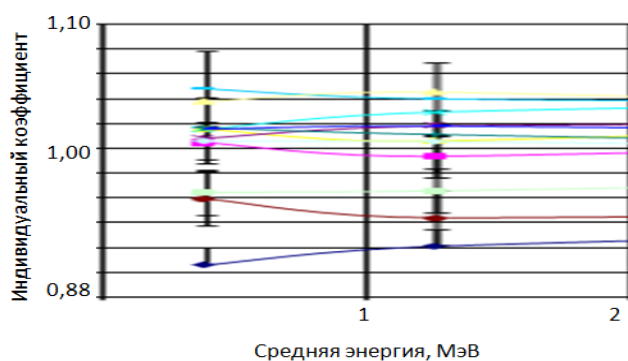


Рис. 6. Зависимость индивидуальных коэффициентов ТЛД от средней энергии излучения для пучков разных качеств

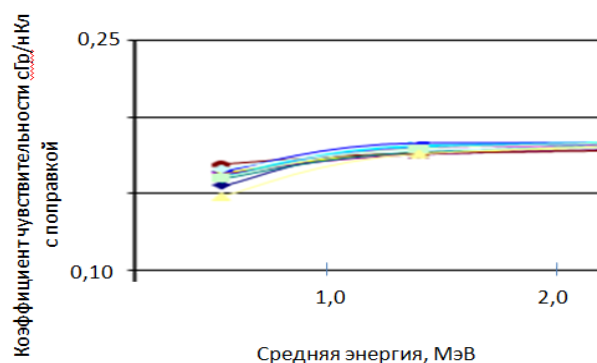


Рис. 7. Энергетическая зависимость коэффициента чувствительности ТЛД

получаем поглощенную им дозу, с минимальным отклонением от среднего по группе (менее 2 %). В идеальном случае индивидуальный коэффициент должен быть равен единице. В реальных условиях эксперимента он может отклоняться от единицы, так как условия облучения, параметры считывателя и внешние условия всегда будут влиять на показания ТЛД. Мы проследили зависимость индивидуального коэффициента от энергии излучения. Графики демонстрируют отсутствие определенной зависимости. Видимо, качество излучения вносит меньший вклад в показания, чем флуктуации считывателя и другие внешние факторы. Таким образом, можно заключить, что воспроизводимость показаний ТЛД не изменяется для пучков приведенных качеств.

Очевидно, что для коэффициентов чувствительности энергетическая зависимость

прослеживается. Поскольку коэффициент чувствительности рассчитывается, как отношение значения поглощенной дозы ТЛД в нКл, определенной с помощью ИК, к показаниям считывателя для данного ТЛД в нКл, можно предположить, что значение этого коэффициента определяется показаниями считывателя, так как поглощенная доза для всех ТЛД заведомо одинакова. Чтобы исключить погрешность, связанную с воспроизводимостью показаний ТЛД, умножим коэффициент чувствительности на индивидуальный коэффициент. Мы получаем "поправленный" индивидуальный коэффициент. Зависимость "поправленного" коэффициента от энергии излучения приведена на рис. 8а.

В соответствии с литературными данными [3], энергетическая зависимость LiF имеет вид рис. 8б и наблюдается для энергий ниже

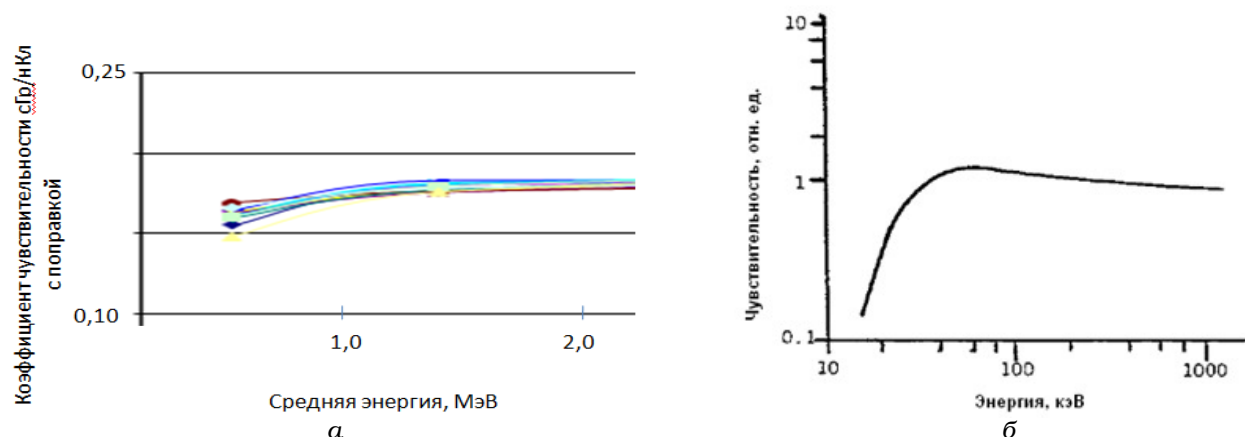


Рис. 8. а – энергетическая зависимость поправленного коэффициента чувствительности ТЛД, б – энергетическая зависимость чувствительности материала LiF

80 кэВ. Полученная же нами зависимость рис. 8 построена по данным пучков различных качеств для совершенно определенной геометрии и реальных клинических условий. Напомним, что для источника ^{192}Ir энергия излучения 0,38 МэВ является средней. А реальный спектр излучения ^{192}Ir сложен и представлен на рис. 8б [3]. Именно этим можно объяснить наличие энергетической зависимости коэффициента чувствительности для энергий меньше 1 МэВ на рис. 8а.

Заключение

Проведена комплексная калибровка ТЛД дозиметров для пучков трех качеств фотонного излучения с энергиями 6 МэВ и 1,25 МэВ и пучке ^{192}Ir с энергией 0,38 МэВ.

Из партии ТЛД в 175 штук детекторов при калибровке в фотонном пучке 6 МэВ были отобраны 12 детекторов с воспроизводимостью показаний не хуже 2 % по группе. Эта партия была откалибрована в фотонном пучке 1,25 МэВ и в пучке источника ^{192}Ir с энергией 0,38 МэВ. Методика калибровки ТЛД в пучках дистанционных аппаратов известна и использовалась в стандартном варианте. Методика калибровки ТЛД для аппарата внутритканевой терапии разрабатывалась «с нуля».

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют:

- ✓ о наличии энергетической зависимости индивидуальных коэффициентов чувствительности ТЛД в диапазоне энергий от 0,38 до 1,0 МэВ;
- ✓ об отсутствии зависимости величин индивидуальных коэффициентов ТЛД от энергии излучения в указанном диапазоне качеств пучков излучения.

Ход экспериментальной кривой зависимости чувствительности ТЛД от энергии согласуются с литературными данными. После проведения калибровочных процедур возможно применение одной и той же рабочей партии ТЛД для различных качеств пучков.

Список литературы

1. Van Dam J, Marinello G. Methods for *In Vivo* Dosimetry in External Radiotherapy. ESTRO Booklet No. 1. ESTRO. 2006; 37-54.
2. Закономерности распределения примесных центров в ионных кристаллах. Сборник научных трудов ВИМС. М. 1975 [Regularities of the distribution of impurity centers in ionic crystals. Collection of scientific papers VIMS. M. 1975].
3. Borg J, Rogers DWO. Monte Carlo Calculations of Photon Spectra in air from Ir-192 sources. Ionizing Radiation Standards Institute for National Measurement Standards National Research Council. Ottawa. Ontario. K1A 0R6. Canada. 1999.
4. Сухина ЕН, Старенький ВП, Свиначенко АВ, Нестеренко АС, и др. Использование дозиметрии *in vivo* при проведении дистанцион-

- ной лучевой терапии пациенткам с местнораспространенным раком шейки матки. Украинский радиологический журнал. 2015; XXIII: 2: 102-3. ISSN 1027-3204.
5. Kapp KS, Stuecklschweiger GF, Kapp DS, Hackl AG. Dosimetry of intracavitary placements for uterine and cervical carcinoma: results of orthogonal film, TLD, and CT-assisted techniques. *Radiother Oncol.* 1992; 24: 137-46.
 6. Wuerfel J. Dose measurements in small fields. *Med Phys.* 2013; 1: 81-90.
 7. Le Roym, et al. Assessment of small volume ionization chambers as reference dosimeters in high-energy photon beams. *Phys Med Biol.* 2011; 56: 5637-50.

CALIBRATION OF THERMOLUMINESCENT DOSIMETERS FOR USE IN PHOTON RADIATION BEAMS OF VARIOUS QUALITY

I.D. Uhanov¹, I.M. Lebedenko^{1,2}

¹ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

² N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

Purpose: To describe the technology of dosimetric preparation of the same batch of TLD based on LiF activated by magnesium Mg and titanium Ti (LiF:Mg-Ti) for three qualities of photon radiation beams with energies of 1.25 MeV, 2 MeV and ¹⁹²Ir beam with energy of 0.38 MeV for measurements during radiotherapy. The TLD calibration technology for ¹⁹²Ir should be developed from scratch. To compare the energy dependences of the sensitivity coefficients for different qualities of the beams.

Material and methods: 175 dosimeters were irradiated in photon radiation beams with all energy of 2 MeV, 1.25 MeV and 0.38 MeV in a reproducible geometry several times determined by the same dose. Individual coefficients are obtained. A working batch of 12 TLD was selected with a production capacity of 2 %. Coefficients are estimated for the batch and graphs of the energy dependence of individual sensitivity coefficients are constructed.

Results: The results obtained indicate the presence of an energy dependence of the individual sensitivity coefficients of TLD in the energy range from 0.38 to 1.0 MeV.

Key words: *thermoluminescent dosimeters, calibration, radiotherapy, individual sensitivity coefficients*

E-mail: imlebedenko@mail.ru