

# Измерение поглощенной дозы в пучках ионов с помощью ТЛД для лечебной терапии

Рассмотрена возможность использования ТЛД в процедурах по проверке качества оборудования при лечебной терапии с помощью пучка ионов. Аналогичный подход широко применяется для пучков фотонов и электронов. Рассматривается метод высокотемпературного соотношения  $HTR$  для получения поправки на уменьшение чувствительности ТЛД при их облучении излучением с большой ЛПЭ. Получена эмпирическая зависимость величины поправки для измерения поглощенной дозы с помощью ТЛД от параметра  $HTR$ . Обсуждается ряд моментов в методике измерения поглощенной дозы с помощью ТЛД в пучках ионов, позволяющих снизить величину неопределенности в измерениях.

**Ключевые слова:** ТЛД, ионы углерода, ЛПЭ, обеспечение качества.

А.Г.Алексеев<sup>1</sup>, А.Г.Васильева<sup>1</sup>,  
О.В.Кириухин<sup>2</sup>, В.А.Пикалов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> «НИЦ Курчатовский институт» – ИФВЭ,  
г. Протвино

<sup>2</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Контроль качества оборудования, применяемого в лучевой терапии, является составной частью общих программ гарантии качества лучевой терапии. Данное требование предусмотрено в международных нормативных документах [1-3]. Частью программ качества являются процедуры, направленные на контроль качества пучка и контроль оборудования лучевой терапевтической установки [4-8]. В ряде этих процедур широко используются термолюминесцентные детекторы (ТЛД).

Примеры.

1. Одним из простейших механизмов независимой проверки калибровки внешнего пучка или физической дозиметрии является участие в аудиторской проверке качества дозиметрии с использованием ТЛД, проводимой МАГАТЭ/ВОЗ, в которой ТЛД пересылаются по почте [6]. В России данную процедуру прошли 128 организаций [7].

2. ТЛД широко используются для проверки расчетных планов облучения [8-10].

3. ТЛД используются для измерения дозы *in vitro* [11].

Использование ТЛД в программах качества электронных и фотонных пучков обеспечивает величину неопределенности измерения поглощенной дозы на уровне 1–3% (при  $k = 1$ ) [6]. Однако оценка неопределенности измерения при использовании ТЛД в случае пучков ионов (например, углерода) требует определенных исследований.

В мире в настоящий момент функционируют 15 центров, использующих пучки ионов углерода для целей лучевой терапии, а число пациентов, прошедших терапию в таких пучках, превысило 50 тысяч [12]. В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ создана экспериментальная установка Радиобиологический стенд (РБС). Она работает на выведенном из ускорительного комплекса У-70 пучке ускоренных ионов  $C^{+6}$  промежуточных энергий 200–450 МэВ/нуклон. Установка сертифицирована как центр коллективного пользования и регулярно работает в каждом сеансе работы ускорительного комплекса У-70 с 2015-го г. На установке проводятся радиобиологические и доклинические исследования, направленные на разработку отечественных методик лечения онкологических заболеваний с применением углеродной ионно-лучевой терапии. Работа ведется совместно со специалистами из МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск), ИТЭБ РАН (Пущино), ГНЦ РФ – ИМБП РАН (Москва) и многих других институтов [13].

В будущем планируется использование ТЛД в процедурах, обеспечивающих гарантию качества лучевой терапии, в том числе для верификации разрабатываемой в данный момент системы планирования лучевой терапии с помощью ядер углерода. Для обеспечения качества в измерении поглощенной дозы в пучке ядер углерода необходимо учесть все факторы, влияющие на погрешность измерения. Например, в работе [14] было выполнено

исследование зависимости чувствительности ТЛД от линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения. Цель настоящей работы – уточнение данных по поправке, учитывающей уменьшение чувствительности ТЛД при увеличении ЛПЭ излучения для корректировки показаний ТЛД в пучках ионов.

### Используемые средства измерения

В работе использовались поликристаллические термолюминесцентные дозиметры МТТ-7 (RADCARD, Польша):  ${}^7LiF:Mg,Ti$ , 50 ppm Mg, 120 ppm Ti, размеры которых составляют:  $\varnothing 4,5 \times 0,9$  мм. Они разработаны специально для дозиметрии в пучках ионов с большими значениями ЛПЭ. Данные ТЛД изготовлены из 99,99% обогащенного по изотопу Li-7 материала для исключения влияния тепловых нейтронов, а также используется повышенное содержание активатора Ti для увеличения величины чувствительности в области высоких ЛПЭ. Выполненная сравнительная калибровка разных типов ТЛД в пучках ионов с ЛПЭ от 20 до 300 кэВ/мкм подтвердила, что данные ТЛД обладают наилучшими с этой точки зрения характеристиками [14,15].

В данной работе для ТЛД применялась индивидуальная калибровка и перенос величины поглощенной дозы от Государственного первичного эталона поглощенной дозы контрольному калибровочному источнику с помощью группового компаратора. Это позволяет обеспечивать измерение поглощенной дозы от ядер углерода с погрешностью не хуже 5%. Так, в работе [16] было показано, что групповой компаратор обеспечивает передачу величины мощности дозы от Государственного первичного эталона поглощенной дозы не хуже 4%.

Для обработки ТЛД использовалась установка HARSHAW-3500 (Thermo Fisher Scientific, США) в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Использовался следующий режим работы: быстрый предварительный нагрев до 100 °С в течение 10 с, затем измерение во время нагрева со скоростью 3 °С/с в течение 80 с.

Облучение ТЛД было проведено на установке РБС (радиобиологический стенд) ядрами углерода энергии 200 МэВ/нуклон. Описание и характеристики установки РБС, а также параметры пучка приведены в [13].

Чтобы охватить большой диапазон ЛПЭ, облучение ТЛД проводилось в водном фантоме на разной глубине, то есть в разных точках кривой Брэгга, которая отражает потери энергии частицы при ее прохождении через вещество. При этом в разных точках величина ЛПЭ разная. Водный фантом разработан и изготовлен в ИФВЭ. Параметры фантома приведены в табл.1. Изменение координат кессона внутри фантома осуществляется с помощью точной автоматизированной системы перемещения.

Облучение сопровождалось измерением дозы в точке облучения с помощью универсального прецизионного дозиметра UNIDOS webline компании PTW (PTW-Freiburg, Германия; сертифицирован как средство измерения, номер в Госреестре: 37971-08), ионизационная камера – PTW Farmer 30013. Также

**Табл.1.** Параметры водного фантома изготовления ИФВЭ.

Внешние размеры:	590×360×375 мм
Материал стенок:	поликарбонат
Толщина передней стенки (относительно направления пучка):	30 мм
Толщина боковых стенок:	15 мм
Внешние размеры кессона:	130×240×265 мм
Толщина передней стенки кессона:	5 мм
Материал передней стенки кессона:	ПММА
Толщина задней и боковых стенок кессона:	15 мм
Материал задней и боковых стенок кессона:	поликарбонат

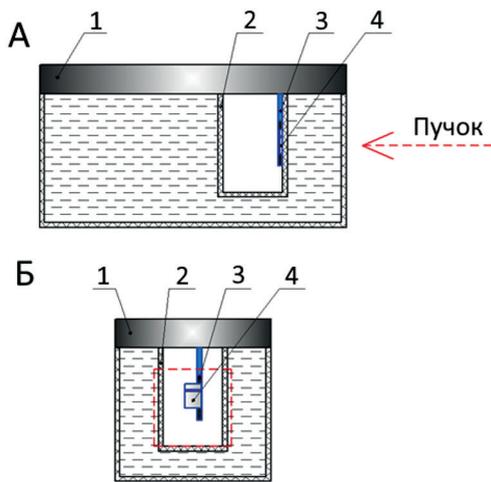
в работе использовалась плоскопараллельная ионизационная камера в зале ускорителя У-70 изготовления ИФВЭ. Камера предназначена для измерения интенсивности пучка, выведенного из ускорителя У-70. Газовая смесь – воздух; 2 воздушных зазора 3 и 6 мм (два сигнальных электрода и один высоковольтный). Апертура – 160 мм, габаритные размеры – 230×230×55 мм. Рабочее напряжение – 1 кВ, материал электродов – полиамидная пленка 12 мкм с алюминиевым напылением.

Величины ЛПЭ в разных точках кривой Брэгга были получены расчетным способом с использованием программ FLUKA (версия 4.3-3) и MCNPX [17]. В качестве тестирования программы для расчетов переноса ядер углерода в фантоме использовались экспериментальные данные из работы [18].

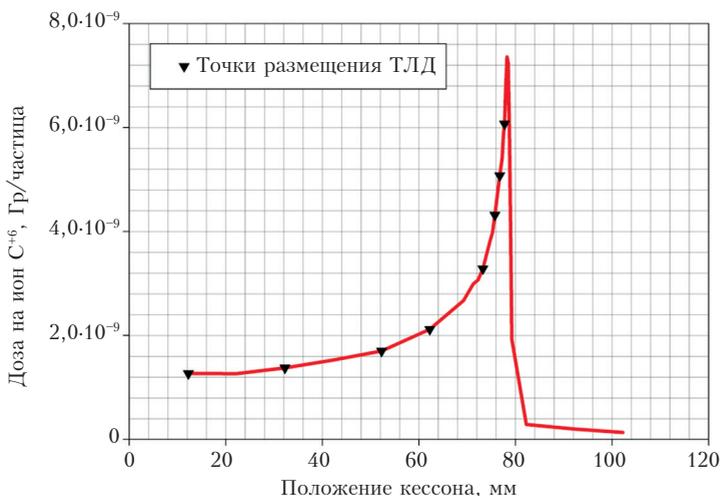
### Облучения ТЛД на экспериментальной установке РБС

Перед началом облучения водный фантом был заполнен обессоленной водой. Облучение велось на энергии 200 МэВ/нуклон. Для достижения равномерного поля 100×100 мм в зоне облучения использовалась электромагнитная сканирующая система, описанная в [13]. На рис.1 схематично показано взаимное расположение пакета с ТЛД и ионизационной камеры внутри кессона водного фантома при облучении. Измерения проводились в 8 точках, на каждую точку закладывалось по два ТЛД типа МТТ-7 в пакете.

Предварительно в автоматическом режиме был произведен поиск координат пика Брэгга (рис.2) при помощи двух ионизационных камер: плоскопараллельной ионизационной камеры в зале ускорителя У-70 (в качестве дозиметра-свидетеля) и закрепленной внутри кессона водного фантома ионизационной камеры Farmer 30013. Измерения распределения поглощенной дозы по глубине проводились посредством автоматического перемещения



**Рис.1.** Схема взаимного расположения пакета с ТЛД и ионизационной камеры внутри кессона водного фантома при облучении в каждой закладке (масштаб не соблюден). А – вид сбоку; Б – вид «спиной к пучку», красный пунктир – зона равномерного вывода. 1 – водный фантом с автоматической системой перемещения; 2 – кессон; 3 – ионизационная камера РТW Farmer 30013; 4 – пакет с ТЛД.



**Рис.2.** Пик Брэгга в водном фантоме на энергии 200 МэВ/нуклон.

вместе с кессоном ионизационной камеры Farmer 30013 вдоль оси пучка. В качестве дозиметра использовался дозиметр РТW UNIDOS weblinе.

При измерении были учтены начальные смещения системы перемещения, толщина входного окна фантома и кессона:  $y$  – программная координата положения кессона водного фантома,

$y_{true}$  – реальная координата точки измерения в воде, включая водные эквиваленты материала окна в стенке фантома (оргстекло, толщина 5 мм) и передней стенки кессона (оргстекло, толщина 5 мм), а также 1 мм воды до передней стенки кессона; водные эквиваленты взяты по плотностям. Расчетная плотность оргстекла:  $\rho(\text{PMMA}) = 1,126 \text{ г/см}^3$ . Отсюда:  $y_{true} = 304 - y + 10 \cdot 1,126 + 1$ .

Значения реальных доз и координат облучения представлены в табл.2. Дозы, полученные при обработке ТЛД, приведены в табл.3 вместе с координатами точек облучения.

### Облучение на ионной машине ФТЦ ФИАН

Облучение на ионной машине ФТЦ ФИАН было выполнено в пучке альфа-частиц для максимальной энергии 320 МэВ. ТЛД облучались с использованием набора полиэтиленовых замедлителей цилиндрической формы разной длины. На обоих торцах замедлителей располагались ТЛД и радиохромная дозиметрическая пленка Gafchromic EBТ3 (Ashland, США). Габаритные размеры замедлителей приведены в табл.4. Геометрия облучения приведена на рис.3.

Радиохромная пленка позволяла оценить однородность облучения сборки замедлителей с ТЛД. Однородность поля облучения по дозе была не хуже  $\pm 5\%$ .

### Метод НТR

В работе [19] приведены два способа определения поправки показаний ТЛД в случае их использования в пучках ионов. Первый – использование двух типов ТЛД, которые имеют разную зависимость чувствительности от величины ЛПЭ. Второй – использование

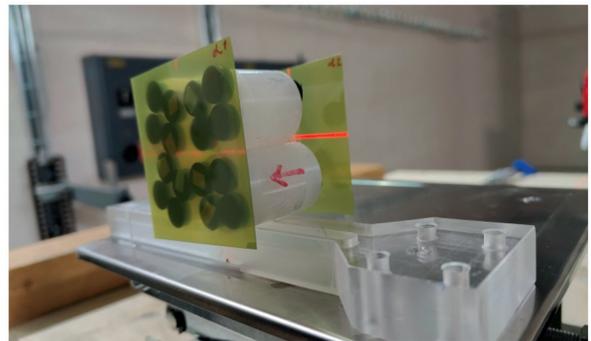
**Табл.2.** Значения реальных доз и координат облучения для каждой из закладок ( $D_y$  – доза установочная;  $D_p$  – реальная доза, согласно дозиметру).

№ пакета	$D_y$ , Гр	$D_p$ , Гр	Программная координата $y$ , мм	Реальная координата $y_{true}$ , мм
1	1	0,927	304	12,26
2		1,095	284	32,26
3		0,966	264	52,26
4		0,981	254	62,26
5		1,083	243	73,26
6		0,933	240,5	75,76
7		1,308	239,5	76,76
8		0,693	238,5	77,76

**Табл.3.** Значения доз по ТЛД, реальных доз и координат облучения для каждой точки ( $D_y$  – доза установочная;  $D_p$  – реальная доза, согласно дозиметру,  $D_{ТЛД}$  – доза по каждому ТЛД в пакете,  $D_{ср}$  – средняя доза по пакету).

№ пакета	Реальная координата $y_{true}$ , мм	$D_y$ , Гр	$D_p$ , Гр	$D_{ТЛД}$ , Гр	$D_{ср}$ , Гр
1	12,26	1	0,927	0,659	0,650
				0,641	
2	32,26		1,095	0,823	0,815
				0,807	
3	52,26		0,966	0,705	0,690
				0,675	
4	62,26		0,981	0,649	0,661
				0,673	
5	73,26	1,083	0,644	0,637	
			0,631		
6	75,76	0,933	0,472	0,490	
			0,509		
7	76,76	1,308	0,791	0,746	
			0,701		
8	77,76	0,693	0,293	0,291	
			0,290		

анализа кривой термовысвечивания (КТВ) ТЛД и такого параметра как высокотемпературное соотношение НТР (англ. high-temperature ratio) для оценки ЛПЭ в точке облучения. В данной работе использовался второй способ, который изначально был предложен в работе [20], он также называется



**Рис.3.** Геометрия облучения в пучке альфа-частиц с энергией 320 МэВ.

**Табл.4.** Габаритные размеры полиэтиленовых замедлителей.

Номер замедлителя	Диаметр, мм	Длина, мм
1	26	42,9
2		46
3		36,4
4		27,9

методом НТР. Метод НТР основан на расчете одноименного параметра:

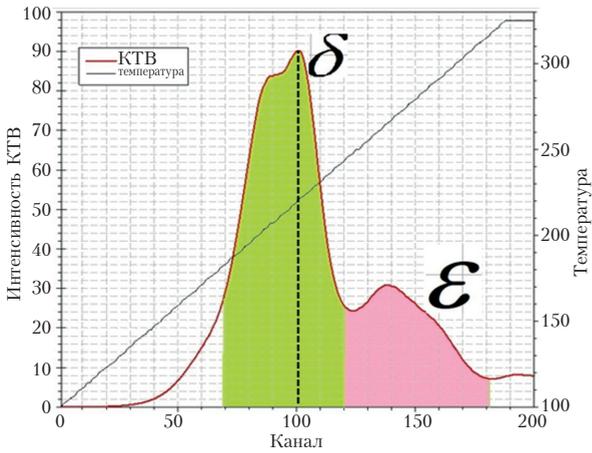
$$HTR = \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_{ЛПЭ} \times \left(\frac{\varepsilon}{\delta}\right)_{\gamma}^{-1},$$

где  $\varepsilon$  – интеграл в интервале температур 240–340 °С;  $\delta$  – значение в максимуме дозиметрического пика КВТ (рис.4); индекс ЛПЭ – КТВ, получаемые при облучении в исследуемом излучении; индекс  $\gamma$  – КТВ для стандартного гамма-излучения ( $^{137}\text{Cs}$ ). На рис.5 для примера приведены КТВ при облучении протонами энергии 30 МэВ и для  $^{137}\text{Cs}$ .

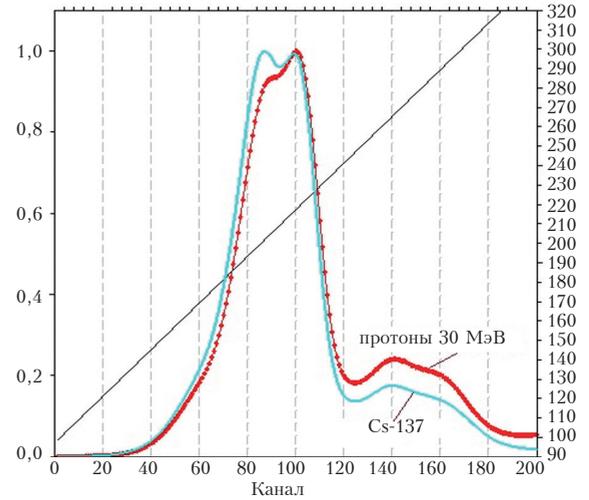
### Результаты

На рис.6 приведено сравнение расчетной и экспериментально измеренной кривой Брэгга. На рис.7 – расчетная величина ЛПЭ в разных точках кривой Брэгга и точки облучения ТЛД (при энергии ядер углерода 200 МэВ/нуклон).

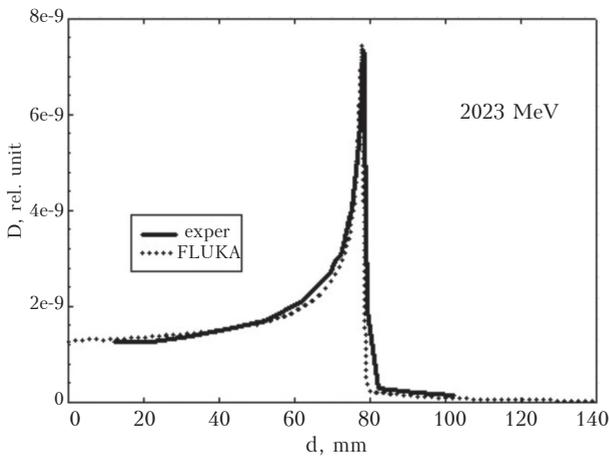
На рис.8 для сравнения приведены КТВ при облучении ТЛД ядрами углерода одной энергией 200 МэВ/нуклон, но для двух раз-



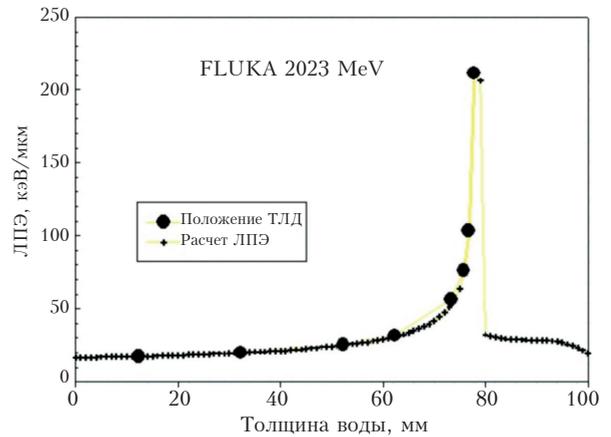
**Рис.4.** КТВ и параметры для расчета НТР.



**Рис.5.** КТВ для протонов энергии 30 МэВ и для гамма-квантов при одинаковой дозе 1 Гр [21].



**Рис.6.** Кривая (пик) Брэгга: расчет и эксперимент. Первичная энергия ядер углерода при ускорении 200 МэВ/нуклон.



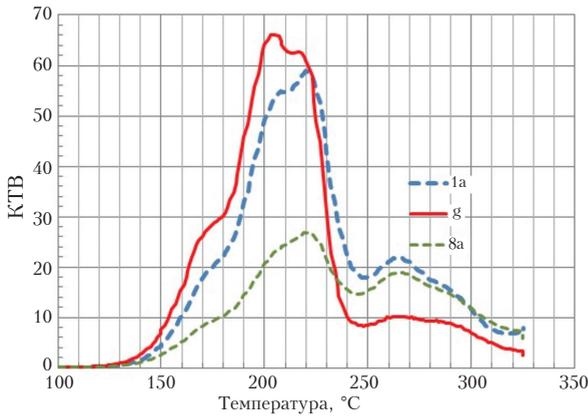
**Рис.7.** Расчетная величина ЛПЭ в разных точках кривой Брэгга и точки облучения ТЛД.

ных точек на кривой: в начале водного фантома и в пике кривой Брэгга.

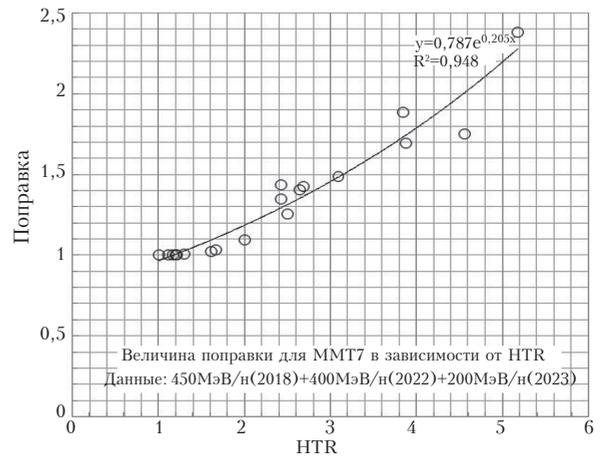
На рис.9 приведена итоговая величина поправки при измерении поглощенной дозы ТЛД типа МТТ-7 в зависимости от параметра НТР. Совокупно использовались все имеющиеся на текущий момент экспериментальные данные, в том числе для энергий ионов углерода 400 и 450 МэВ/нуклон [21,22].

Однозначная зависимость поправки и средней по дозе ЛПЭ от НТР позволяет получать не только корректное значение поглощенной дозы, но и оценивать значение ЛПЭ в точке измерения (рис.10).

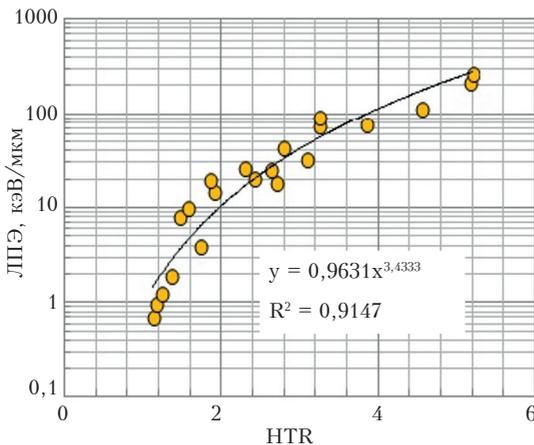
При расчете величины НТР использовались данные КТВ и  $(\epsilon/\delta)_\gamma$ , полученные при калибровке на стандартном радионуклидном источнике  $^{137}\text{Cs}$ . Доза облучения гамма-излучением составляла 1 Гр. Следует иметь в виду, что отношение  $(\epsilon/\delta)_\gamma$  при дозах выше 1 Гр растет вместе с увеличением дозы [21,23]. Таким образом, для корректного учета зависимости НТР от ЛПЭ поглощенная доза от ионов не должна превышать 1 Гр. В той же работе [23] приведена зависимость поправки для измерения дозы с помощью ТЛД типа МТТ-7. На рис.11 приведено сравнение зависимости поправки для МТТ-7 и МТТ-7 [23].



**Рис.8.** КТВ при облучении ядрами углерода энергии 200 МэВ/нуклон для двух точек на кривой: 1а – в начале кривой Брэгга (ЛПЭ = 17,7 кэВ/мкм); 8а – в пике Брэгга (ЛПЭ = 211 кэВ/мкм); g – КТВ для стандартного источника  $^{137}\text{Cs}$ .



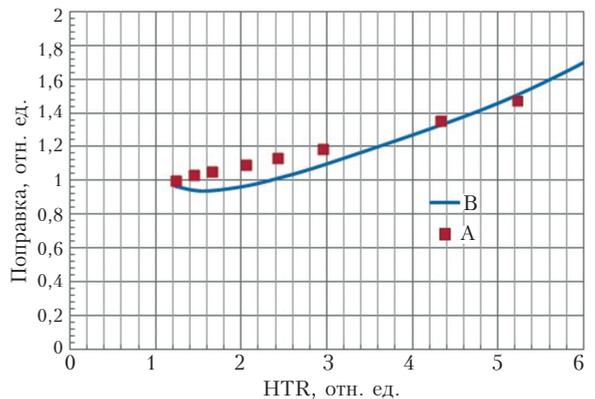
**Рис.9.** Величина поправки при измерении поглощенной дозы ТЛД типа ММТ7, в зависимости от параметра HTR.



**Рис.10.** Оценка величины ЛПЭ в зависимости от параметра HTR.

В диапазоне ЛПЭ 1–10 кэВ/мкм для MTS-7 наблюдалось увеличение чувствительности, при этом такого же эффекта для МТТ-7 в данной работе замечено не было. Этим объясняется некоторое различие поправок в диапазоне HTR от 1 до 3.

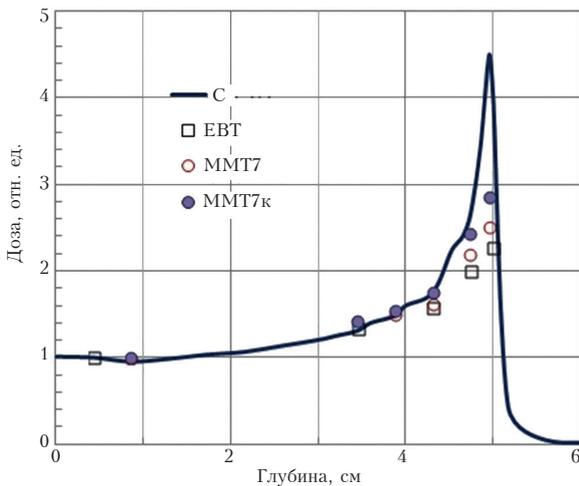
На рис.12 приведена зависимость дозы от глубины фантома для альфа-частиц с энергией 320 МэВ: расчетное значение, доза, измеренная с помощью радиохромной пленки, и ТЛД (с поправкой и без поправки). Как и ожидалось, доза, при измерении которой использовалась поправка, оказалась более близка



**Рис.11.** Сравнение зависимости поправки для ТЛД типа ММТ-7 (B) и МТС-7 (A) от величины HTR.

к расчетной величине (расчет был выполнен по программе MCNPX). Вблизи пика Брэгга трудно ожидать точного совпадения результатов расчета и измерения, так как ТЛД имеет сравнимую с размером пика Брэгга толщину. Тем не менее, результаты на рис.12 показывают, что эмпирическая зависимость поправки, полученная для ионов углерода, применима и к такому типу ионов, как альфа-частицы.

Как уже было замечено в [21,23], при использовании поправки на основе HTR неопределенность за счет зависимости чувствительности ТЛД от ЛПЭ может составлять порядка 40%.



**Рис.12.** Кривая Брэгга (зависимость поглощенной дозы по глубине фантома) для альфа-частиц. C – расчет EBT – доза по радиохромной пленке Gafchromic EBT3; MMT7 – доза по ТЛД без коррекции, MMT7к – доза по ТЛД с учетом поправки.

### Заключение

Выполненные в настоящей работе исследования показывают, что соблюдая определенные условия, можно гарантировать, что неопределенность измерения поглощенной дозы в пучках ядер углерода может быть сравнима с величиной, которую получают при измерении дозы в пучках фотонов и электронов. Бюджет неопределенности включает погрешность передачи единицы поглощенной дозы в воде. При использовании метрологической поверочной схемы, которая определяется документами [24,25], величина этой составляющей неопределенности не превышает 2–3%. Другие составляющие неопределенности, как указано в работе [23], могут давать суммар-

ную величину до 10%. Если не используется поправка для измерения абсолютной величины поглощенной дозы, неопределенность, например, для протонов энергии выше 80 МэВ может составлять 4,65%, а для протонов энергии ниже 80 МэВ – 152% [26].

В данной работе было показано, что для однородного пучка (например, только ядра углерода или только протоны) можно использовать поправку для определения поглощенной дозы, полученную с помощью метода НТР. Неопределенность, обусловленная данной поправкой, не превышает 3–4%.

Если принять, что величина суммарной неопределенности измерения поглощенной дозы, рекомендованной для медицинского применения, составляет 5% [4], то разработанная методика измерения обеспечивает непревышение данной величины. Это позволяет использовать ТЛД в тех же процедурах, обеспечивающих гарантии качества лучевой терапии в пучках ионов, в которых они уже широко используются для пучков фотонов и электронов.

Работа выполнялась в рамках НИОКТР №124041200036-7 «Прикладные исследования и разработки по развитию применения ядерных технологий в медицине» в обеспечение выполнения Государственного задания на 2024 г. и плановый период 2025 и 2026 гг.

### Благодарности

Авторы благодарят А. Шемякова за облучение в пучках альфа-частиц и О. Суманеева за расчеты в программе FLUKA.

## Литература

1. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности. Нормы безопасности МАГАТЭ. Общие требования безопасности. Часть 3. № GSR, Part 3, МАГАТЭ, Вена, 2015. [Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: international basic Safety Standards. IAEA. – General Safety Requirements Part 3. 2011 (In Russian)].
2. Radiation protection and safety in medical uses of ionizing radiationю IAEA Safety Standards Series no. SSG-46. 2017.
3. Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities. Safety Reports Series. no. 47. International Atomic Energy Agency. 2006.
4. Quality Assurance of External Beam D.I. Thwaites, B.J. Mijnheer, J.A. Mills of the IAEA publication (ISBN 92-0-107304-6): Radiation Oncology Physics. URL: [https://international.anl.gov/training/materials/IAEA%20Publications/Radiation%20Oncology%20Physics%20Handbook/Radiation%20Oncology%20Physics%20-%20Slides%20-%20pdf/Chapter\\_12\\_QA\\_in\\_radiotherapy.pdf](https://international.anl.gov/training/materials/IAEA%20Publications/Radiation%20Oncology%20Physics%20Handbook/Radiation%20Oncology%20Physics%20-%20Slides%20-%20pdf/Chapter_12_QA_in_radiotherapy.pdf) (дата обращения 14.08.2024).
5. Radiological protection for medical exposure to ionizing radiation - safety standards series No. RS-G-1.5- SAFETY GUIDE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-VIENNA, 2002. URL: <https://regelwerk.grs.de/sites/default/files/cc/dokumente/RS-G-1.5.pdf> (дата обращения 14.08.2024).
6. Joanna Izewska, Wolfgang Lechner, Paulina Wesolowska, «Global availability of dosimetry audits in radiotherapy: The IAEA dosimetry audit networks database» URL: <https://doi.org/10.1016/j.phro.2017.12.002>-Physics and Imaging in Radiation Oncology-Volume 5, January 2018, Pages 1-4.
7. Шатенок М.П. , Толкачев К.В. , Монсеев А.Н., Кислякова М.В., Казанцев П.В., Рыжов С.А., Соколов Е.Н. Анализ результатов ТЛД/РФЛД аудитов МАГАТЭ дистанционного радиотерапевтического оборудования в России за последние 20 лет//Радиация и риск. 2020. Том 29. DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-164-172.
8. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international code of practice for dosimetry on standards of absorbed dose to water. 2000. IAEA Report TRS-398. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
9. Guidelines for the Verification of IMRT. Markus Alber et al. 2008. Estro booklet, Brussels, Belgium.
10. Тарутин И.П. Радиационная защита в лучевой терапии-2015. URL: [https://ozlib.com/912230/meditsina/radiatsionnaya\\_zaschita\\_v\\_luchevoy\\_terapii](https://ozlib.com/912230/meditsina/radiatsionnaya_zaschita_v_luchevoy_terapii) (дата обращения 14.08.2024).
11. Степаненко В.Ф., Бирюков В.А., Каприн А.Д., и др. Внутриполостная автономная «ин виво» дозиметрия при высокоэнергетической брахитерапии рака предстательной железы с применением <sup>192</sup>Ir: разработка технологии и первые результаты//Радиация и риск. 2017. Том 26. № 2. DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-2-72-82.
12. PTCOG - Facilities in Operation. URL: <https://www.ptcog.site> (дата обращения: 14.08.2024).
13. The Results Obtained on «Radiobiological Stand» Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator. V.A. Pikalov, A.G. Alexeev, Y.M. Antipov, V.A. Kalinin, A.V. Koshelev, A.V. Maximov, M.P. Ovsienko, M.K. Polkovnikov, A.P. Soldatov// Proceedings of RuPAC–2021 Russian Particle Accelerator Conference.
14. Алексеев А.Г., Кирюхин О.В., Батухтина О.И. Исследование зависимости характеристик термоминесцентных детекторов от величины ЛПЭ излучения//Евразийский союз ученых. 2019. №2-1(59). С. 43-47. DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2019.1.59.43-47.
15. P. Bilski et al., «Comparison of the response of various TLDs to cosmic radiation and ion beams: Current results of the HAMLET», *Radiation Measurements*, no. 46, pp. 1680-1685, 2011.

16. Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Алексеев П.А. Межлабораторное сличение средств индивидуального дозиметрического контроля хронического облучения персонала на АЭС. Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки, 2022, no. 1(94), pp. 3-10, DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.94.1672.
17. URL: <https://mcnpx.lanl.gov/>; .S. Hendricks, et al., “MCNPX 2.6.0 Extensions”, LA-UR-08-2216 (2008). URL: [https://mcnpx.lanl.gov/reference\\_collection.html#mcnpx\\_refs](https://mcnpx.lanl.gov/reference_collection.html#mcnpx_refs).
18. E. Haettner, H. Iwase, D. Schardt, «Experimental fragmentation studies with  $^{12}\text{C}$  therapy beams», *Radiat Prot Dosimetry*. 2006, no. 122 (1-4):485-7. Doi: 10.1093/rpd/ncl402.
19. Jeppe Brage Christensen, Ivan Domingo Mucoz, Pawel Bilski et al. «Status of LET assessment with active and passive detectors in ion beams», *Radiation Measurements*, no. 177, 2024, 107252.
20. N. Vana, W. Schцner, M. Fugger, Y. Akatov. «Absorbed dose measurement and LET determination with TLDs in space», *Radiation protection dosimetry*, no. 66, pp. 145-152, 1996, URL: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031703> (дата обращения: 14.08.2024).
21. Алексеев А.Г., Васильева А.Г., Пикалов В.А., Кириухин О.В. Калибровка ТЛД в пучке ионов углерода РБС У-70. Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки. 2022. № 6 (99). С. 3-10. DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.99.1672.
22. Methodical issues of the use of detectors for dosimetry in beams of the carbon nuclei of the accelerator U-70. A.G. Alexeev, E.V. Altuhova, I.I. Degtarev et al. RuPAC-2018. Russian Particle Accelerator Conference NRC KI-IHEP PROTVINO: Contributions to the Proceedings. Protvino, 01–05 октября 2018 года. Protvino: JACoW, 2018, pp. 394-396.
23. Pawel Bilski. «On the correctness of the thermoluminescent high-temperature ratio (HTR) method for estimating ionization density effects in mixed radiation fields», *Radiation Measurements*, no. 45, pp. 42-50, 2010.
24. ГЭТ38-2024. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц (номер в государственном реестре – ГЭТ38-2024, хранитель эталона – ФГУП «ВНИИФТРИ»).
25. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (от 26 сентября 2022 г. №2359 Росстандарт). Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы, эквивалента дозы и мощности эквивалента дозы фотонного и электронного излучений, поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы протонного излучения.
26. Chen YS, Wu SW, Huang HC, Chen HH, «Absolute dose measurement and energy dependence of LiF dosimeters in proton therapy beam dosimetry», *The Radiol Oncol*, 6:14. 2022. URL: <https://tro.amegroups.org/article/view/7550/html> ) doi:10.21037/tro-22-16 (дата обращения: 14.08.2024).

## Absolute Dose Measurement in Ion Therapy Beam Dosimetry by TLD

Alexeev Alexander<sup>1</sup>, Vasileva Alina<sup>1</sup>, Kiryuhin Oleg<sup>2</sup>, Pikalov Vladimir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute» – IHEP, Protvino, Russia

<sup>2</sup>MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

**Abstract.** The possibility of using TLD in the same procedures for checking the quality of equipment for radiation therapy using ion beams, which are widely used for photon and electron beams, is considered. The method of the high-temperature ratio HTR is considered to obtain a correction for a decrease in the sensitivity of TLD when they are irradiated with radiation with large LET. The empirical dependence of the correction value for measuring the absorbed dose using TLD on the HTR parameter was obtained. A number of points in the technique of measuring the absorbed dose using TLD in ion beams are discussed, which allow reducing the value the magnitude of the uncertainty in measurements.

**Keywords:** TLD, carbon ions, LET, quality assurance system.

А.Г.Алексеев (с.н.с.)<sup>1</sup>, А.Г.Васильева (инж.)<sup>1</sup>, О.В.Кирюхин (инж.)<sup>2</sup>, В.А.Пикалов (нач.лаб.)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>«НИИЦ Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Контакты: тел. +7 (4967) 71-38-27, ALEXEEV@ihep.ru