



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2009-18  
ОРИ

А.Г. Алексеев\*, Н.А. Карпов<sup>1</sup>

**Исследование термolumинесцентных дозиметров  
ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) для дозиметрии  
в пучках легких ионов**

Направлено в АНРИ

\*e-mail: alexeev@ihep.ru

<sup>1</sup>НТЦ «ПРАКТИКА» (постоянное место работы – МГУ), Москва

Протвино 2009

**Аннотация**

Алексеев А.Г., Карпов Н.А. Исследование термolumинесцентных дозиметров ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) для дозиметрии в пучках легких ионов: Препринт ИФВЭ 2009-18. – Протвино, 2009. – 15 с., 13 рис., 1 табл., библиогр.: 6.

Представлены результаты исследования зависимости чувствительности термolumинесцентных детекторов ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) от величины дозы для нескольких видов излучения (фотонов, тепловых нейтронов, протонов (73 МэВ) и дейтеронов (33 МэВ)). Приведен анализ результатов и сравнение с данными других авторов. Даны рекомендации по использованию данных детекторов для дозиметрии в пучках легких ионов.

**Abstract**

Alexeev A.G., Karpov N.A. Testing of thermoluminescent dosimeters DTG-4 and TLD-1011(T) for dosimetry of ions beams: IHEP Preprint 2009-18. – Protvino, 2009. – p. 15, figs. 13, table 1, refs.: 6.

Response of thermoluminescent detectors DTG-4 and TLD-1011 (T) to dose has been studied photons, thermal neutrons, protons (73 MeV) and deuterons (33 MeV)). The analysis of results and comparison with the data of other authors is executed. Recommendations of this detectors using for dosimetry in ions beams are presented.

## **Введение**

Термolumинесцентные детекторы (ТЛД) ДТГ-4 широко используются в индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) для дозиметрии фотонов. Детекторы ТЛД-1011(Т) были разработаны для дозиметрии низкоэнергетических фотонов и бетаизлучения. Верхний диапазон измерения дозы для ИДК обычно составляет 10 Зв (для гамма-излучения это примерно эквивалентно 10 Гр). В этом диапазоне характеристики ТЛД хорошо изучены. В то же время известно, что при поглощенной дозе выше 10 Гр у ТЛД проявляется эффект отклонения от линейной зависимости чувствительности от дозы. Этот эффект проявляется как в сторону увеличения чувствительности («сверхлинейность»), так и в сторону уменьшения чувствительности («деградация»). Также на чувствительность ТЛД влияет величина линейной передачи энергии (ЛПЭ) ионизирующего излучения, если у него ЛПЭ существенно больше, чем у фотонов.

В течение последних лет в ГНЦ ИФВЭ проводятся работы по модернизации существующего ускорительного комплекса для получения пучков легких ионов (протонов, дейtronов, ядер углерода) [1]. Пучки легких ионов планируется использовать, в том числе, и для медицинских целей. В рамках данной программы в 2008-2009 гг. проводились радиобиологические исследования в пучках протонов и дейtronов на линейном ускорителе И-100 [2]. Верхний диапазон поглощенной дозы для радиобиологических исследований достигал 100...1000 Гр. ТЛД использовались для измерения поглощенной дозы и являлись основным метрологически аттестованным средством измерения в данных радиобиологических исследованиях. Целью данной работы было исследование линейности чувствительности ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) от дозы для протонов и дейtronов на ускорителе И-100.

## Используемые средства измерения

В работе использовались следующие ТЛД:

- ДТГ-4, производства ОАО АЭХК (г. Ангарск). ДТГ-4 – монокристаллические детекторы, состав которых – LiF: Ti, Mg. Диаметр – 4,5мм толщина – 0,96 мм. Для данных исследований у АЭХК были заказаны партии ДТГ-4 с разбросом по чувствительности не хуже 5%. Детекторы, которые были облучены дозами больше 5 Гр, повторно не использовались.
- ТЛД-1011(Т), производства НТЦ «Практика» (г. Москва). ТЛД-1011(Т) – поликристаллические, состав – LiF: Mg, Cu, P. Толщина кристаллофосфора – 5-7 мг/см<sup>2</sup>, площадь – 5x5 мм. Кристаллофорфор нанесен на тонкую алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм. Конструкция ТЛД приведена на рис. 1.
- Дополнительно использовались радиотермолюминесцентные детекторы ИС-7\* (размером 3,5x3,5x1 мм), которые были изготовлены из стандартных детекторов ИС-7, а также кварцевые детекторы (SiO<sub>2</sub>) размером 3,5x3,5x1 мм.

Для определения показаний ДТГ-4 использовался прибор ДТУ-01, остальные ТЛД обрабатывались на термолюминесцентном анализаторе HARSHAW TLD system 4000. Следует подчеркнуть, что результаты представленных ниже исследований касаются линейности систем «прибор+ТЛД».

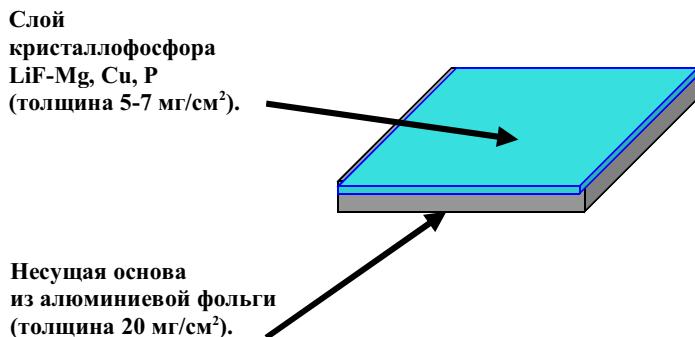


Рис. 1. Конструкция ТЛД-1011(Т).

## **Исследование чувствительности с помощью радионуклидных источников**

На первом этапе исследовалась зависимость чувствительности ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) к фотонному и нейтронному излучениям. ТЛД облучались в поле фотонного излучения  $^{137}\text{Cs}$  и в поле тепловых нейтронов. Чувствительность ТЛД к тепловым нейтронам обусловлена реакцией  $^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{He} + \alpha + 4,78\text{MeV}$ . Таким образом, можно рассматривать нейтронное облучение как измерение чувствительности ТЛД к продуктам реакции со средней ЛПЭ более 100 кэВ/мкм. Для создания тепловых нейтронов радионуклидный источник  $^{239}\text{Pu-Be}$  помещался в центр 30 см полиэтиленового шара. ТЛД располагались в концентрической проточке диаметром 14 см (глубиной 10 мм и шириной 4 мм). Таким образом, между источником и ТЛД было 5 см полиэтилена. Оценка вклада в чувствительность от захватных фотонов (образовавшихся в полиэтилене) проводилась на основе измерения с помощью ДТГ-4-7 (детекторы с обогащенным составом  $^7\text{LiF}$  и низким содержанием  $^6\text{LiF}$ ). Соотношение показаний ДТГ-4-7 и ДТГ-4 составило 1:10. Это дает основание полагать, что вклад захватных фотонов в чувствительность ДТГ-4 не превышал 10%.

На рис. 2 приведена относительная зависимость чувствительности ТЛД-1011(Т) к излучению  $^{137}\text{Cs}$ , полученная в данной работе в диапазоне от 0,1 до 80 Гр, и данные из работы [3]. Выше 5..6 Гр чувствительность монотонно падает. На рис. 3. приведена зависимость чувствительности ТЛД-1011(Т) от дозы тепловых нейтронов. В данном случае под дозой тепловых нейтронов понимаются показания ТЛД (облученных в поле тепловых нейтронов), которые были отградуированы в единицах дозы от фотонов радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Для данного вида излучения для дозы до 80 Гр уменьшения чувствительности для этих ТЛД не наблюдается.

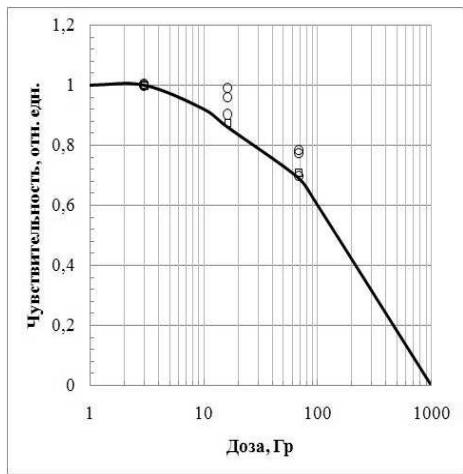


Рис. 2. Относительная чувствительность ТЛД-1011(Т) в зависимости от дозы излучения  $^{137}\text{Cs}$ .  
Кружки – экспериментальные данные (настоящая работа). Сплошная линия – экспериментальные данные [3] для LiF: Mg, Cu, P.

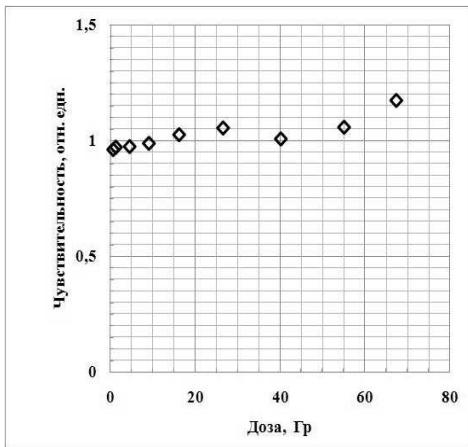


Рис. 3. Относительная чувствительность ТЛД-1011(Т) в зависимости от дозы тепловых нейтронов (доза в единицах дозы фотонов радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ ).

На рис. 4. приведена зависимость чувствительности ДТГ-4 от дозы фотонов  $^{137}\text{Cs}$  радионуклидного источника. Там же приведены данные из работы [3]. Видно, что наши измерения не противоречат результаты работы [3]. На рис. 5 приведена та же зависимость для дозы от тепловых нейтронов и для сравнения приведены данные для фотонов. Для ДТГ-4 зависимость чувствительности от дозы фотонов отличается от зависимости чувствительности ТЛД-1011(Т). При дозах выше 2 Гр наблюдается значительный эффект «сверхлинейности». Для «сильно» ионизирующего излучения (тепловые нейтроны) чувствительность не изменяется (по крайней мере до 80 Гр). Надо отметить, что для фотонного излучения наши данные хорошо согласуются с данными работы [3].

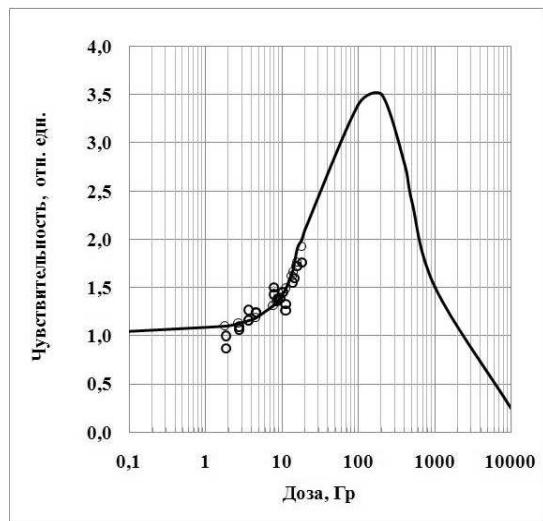


Рис. 4. Относительная чувствительность ДТГ-4 в зависимости от дозы излучения  $^{137}\text{Cs}$ . Кружки – экспериментальные данные (настоящая работа). Сплошная линия – данные [3] для ТЛД-100.

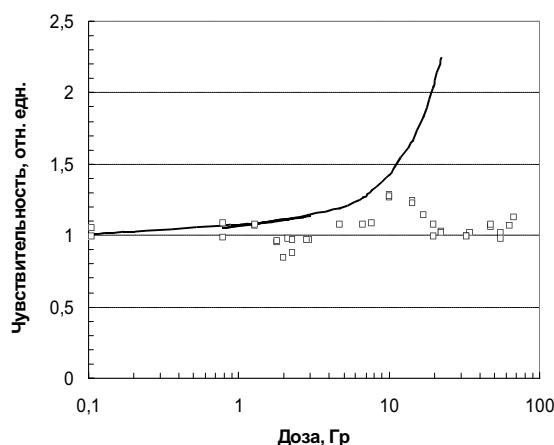


Рис. 5. Относительная чувствительность ДТГ-4 в зависимости от дозы излучения.  
Квадраты – тепловые нейтроны. Линия –  $^{137}\text{Cs}$ .

### Исследование на И-100

Исходные параметры пучков легких ионов, ускоряемых И-100, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры пучков легких ионов	протоны	дейтероны
Мода ускорения	$2\pi$	$4\pi$
Энергия, МэВ/нуклон	72,71	16,69
Магнитная жесткость, BR, Т·м	1,255	1,185
Ток ускоренного пучка (мА)	50	10
Длительность импульса (мкс)	<100	<100
Частота работы, Гц	<1	<1
ЛПЭ, кэВ/мкм	0,925	3

Схема облучения приведена на рис. 6. Ускоренные протоны (73 МэВ) или дейтероны (16,69 МэВ/нуклон) пересекают tantalовую фольгу толщиной 100 микрон. Расстояние между tantalовой фольгой и областью облучения порядка 5 м. Благодаря рассеянию на tantalовой фольге апертура рассеянного пучка в области облучения достигает порядка 1 м. Вакуумная камера (между tantalовой фольгой и областью

облучения) коллимирует пучок таким образом, что на область облучения падает практически равномерный пучок диаметром 100 мм.

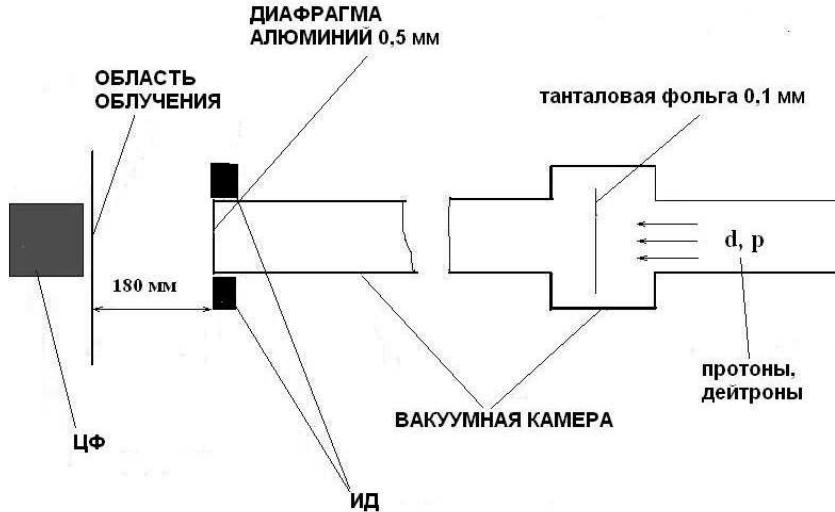


Рис. 6. Схема облучения ТЛД на ускорителе И-100.

Число ускоренных частиц в импульсе определялось с помощью измерения полного заряда частиц. Полный заряд ускоренных в импульсе частиц измерялся двумя детекторами: индукционным детектором (ИД) и цилиндром Фарадея (ЦФ). При облучении дейtronами использовался только ИД, так как малый пробег дейtronов не позволял использовать ЦФ. Пренебрегая ослаблением потока протонов или дейtronов при прохождении через объект облучения, поглощенную дозу можно определить как

$$D = \frac{N}{S \cdot \rho} \cdot \frac{dE}{dx} \cdot 1.602 \cdot 10^{-10}, \quad (1)$$

где  $N$  – число частиц,  $S$  – площадь поперечного сечения пучка,  $\frac{dE}{dx}$  – тормозная способность,  $\rho$  – плотность материала объекта,  $1.602 \cdot 10^{-10}$  – коэффициент преобразования МэВ/г в Гр.

Многократные измерения показали, что значения поглощенной дозы протонов, измеренной с помощью ЦФ и ИД, различаются не более  $\pm 7\%$ . Для примера на рис. 7 приведены результаты измерений.

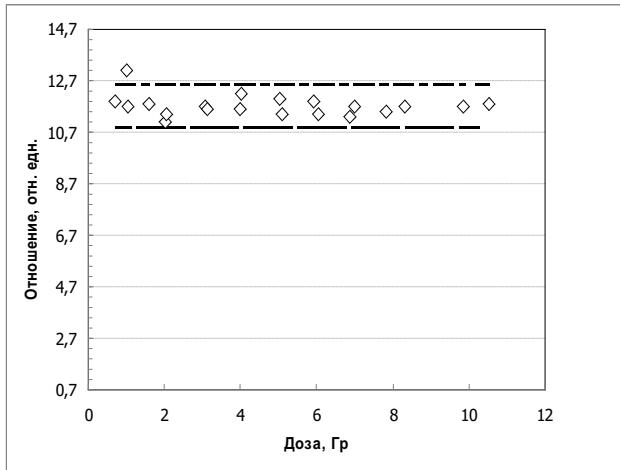


Рис. 7. Отношение показаний ЦФ и ИД в зависимости от дозы протонов.

Штрих-пунктирная линия – коридор отклонения от среднего  $\pm 7\%$ .

При прохождении диафрагмы (выходное вакуумное окно) и танталовой фольги дейtronы и протоны теряют часть энергии. Для расчета дозы по (1) надо оценить энергию частиц, с которой они пересекают область облучения. Была сделана попытка экспериментально оценить эту величину. Для этого ТЛД облучались в потоке частиц за разной толщиной замедлителя. Замедлителем служил капролон (в случае дейтронов) и полиэтилен (для протонов). На рис. 8 приведены результаты измерения дозы при облучении ТЛД в пучке дейтронов. Различие в показаниях ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) объясняется тем, что ТЛД имеют существенно разную толщину чувствительного слоя. В то же время, по показаниям ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) можно оценить пробег дейтронов или толщину, за которой поглощаются все частицы. Разброс частиц по пробегам определяется

эффектом страглинга (обусловлен флюктуацией ионизационных потерь, многократным рассеянием и др.). Распределение частиц по пробегам неплохо описывается нормальным распределением. В качестве среднего квадратичного отклонения была выбрана величина  $\sigma$  (параметр, характеризующий распределение частиц по пробегам), рассчитанная по программе TRIM-98 [4]. Результаты расчета представлены на рис. 9. Таким образом, если величина пробега дейтрона  $R$ , то толщину  $R+2\sigma$  пересчет только 2,3% общего числа частиц. Исходя из этого можно оценить, что  $R+2\sigma = (0,39 \pm 0,1) \text{ г}/\text{см}^2$  и соответственно энергия дейтронов равна  $23,6 \pm 0,4 \text{ МэВ}$ . Аналогичные данные были получены для протонов. Оценка энергии протонов составила  $71,5 \pm 0,5 \text{ МэВ}$ .

На рис. 10 приведена относительная зависимость чувствительности ДТГ-4 от дозы дейтронов (по показаниям ИД).

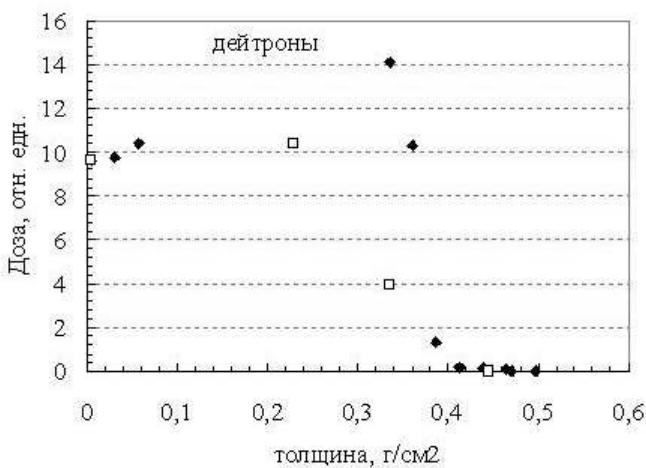


Рис. 8. Доза по показаниям ТЛД за разной толщиной капролона при облучении дейтронами.  
Квадраты – данные по ДТГ-4, ромбы – данные по ТЛД-1011(Т).

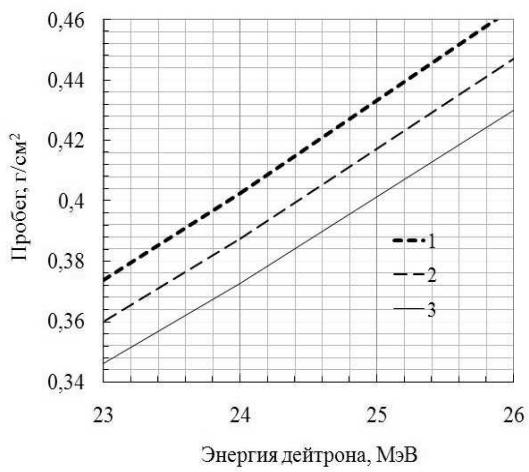


Рис. 9. Пробег R- и  $\sigma$ -дейtronов в капролоне. 1 – R+2 $\sigma$ ; 2 – R+ $\sigma$ ; 3 – R.

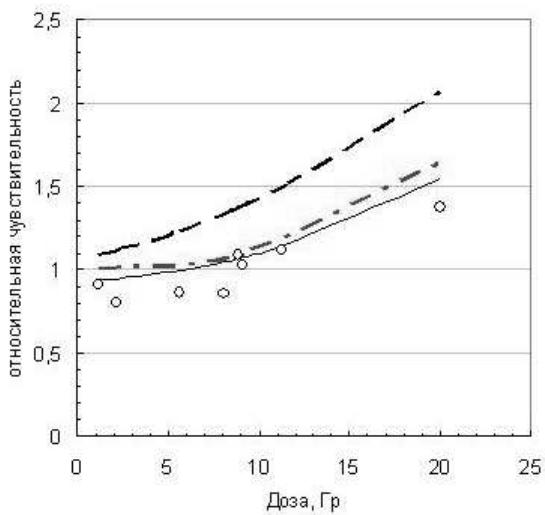


Рис. 10. Относительная зависимость чувствительности ДТГ-4 от дозы. Кружки – экспериментальные данные для дейtronов. Сплошная линия – фит (аппроксимация) экспериментальных данных для дейtronов. Пунктир – фит данных для гамма излучения. Штрих-пунктир – данные [3] по ТЛД-100 для рентгеновского излучения 50 кВ.

По данным [3] и [5] зависимость чувствительности от ЛПЭ для ТЛД-100 (в нашем случае аналог ДТГ-4) проявляется при ЛПЭ частиц выше 7...10 кэВ/мкм. В то же время, в работе [3] приведены данные, что зависимость чувствительности ТЛД-100 для рентгеновского излучения 20 кВ (среднее значение ЛПЭ электронов около 7 кэВ/мкм) и 50 кВ (среднее значение ЛПЭ электронов около 4-5 кэВ/мкм) отличается (кривая «сверхлинейности» идет ниже) от данных для  $^{60}\text{Co}$  при дозах выше 2...3 Гр. Как видно, наши данные при ЛПЭ дейtronов 4 кэВ/мкм не противоречат данным [4]. На рис. 11 приведена относительная зависимость чувствительности ДТГ-4 от дозы протонов. Видно, что для протонов с ЛПЭ 1 кэВ/мкм относительная чувствительность в зависимости от дозы практически совпадает с аналогичной зависимостью для гамма-излучения. На рис. 12 приведена зависимость относительной чувствительности ТЛД-100 от ЛПЭ (L) (данные работы [5]) и данные для ДТГ-4 настоящей работы. Для протонов ( $L=0,925$  кэВ/мкм) относительная чувствительность составила  $1,04\pm0,08$ , для дейtronов ( $L=4$  кэВ/мкм) –  $0,81\pm0,07$ . Данные для ДТГ-4 настоящей работы не противоречат данным по ТЛД-100. На рис.13а и 13б приведены данные по измерению дозы в пучках протонов и дейtronов в зависимости от показаний ИД. В пучке одновременно облучались ДТГ-4, ТЛД-1011(Т), ИС-7 (только в случае протонов),  $\text{SiO}_2$ . Для ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) вводилась поправка на линейность, которая была получена для гамма-излучения. Для ИС-7 и  $\text{SiO}_2$  поправка не вводилась. Для ТЛД-1011(Т) линейность показаний наблюдается в диапазоне до 100 Гр. Для ДТГ-4 верхний диапазон (20 Гр) обусловлен ограничением по верхнему диапазону для прибора ДТУ-01. Для ИС-7 нижний диапазон измерения составил 6-10 Гр, что было связано с большой хемилюминесценцией детекторов. Хотя есть указания [6], что при дозах выше 10 Гр у ИС-7 наблюдается эффект «сверхлинейности», в данной работе в диапазоне до 40 Гр данный эффект не наблюдается.

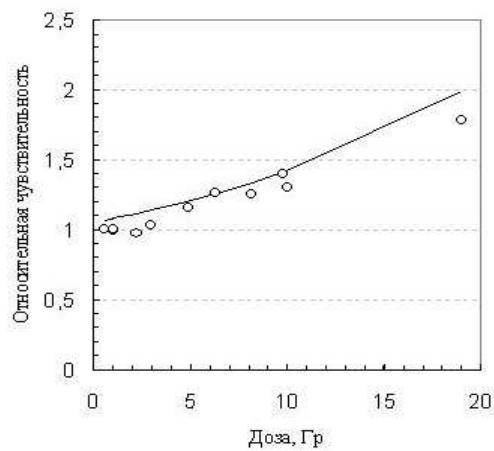


Рис. 11. Относительная зависимость чувствительности ДТГ-4 от дозы. Кружки – экспериментальные данные для протонов, сплошная – фит данных по гамма-излучению.

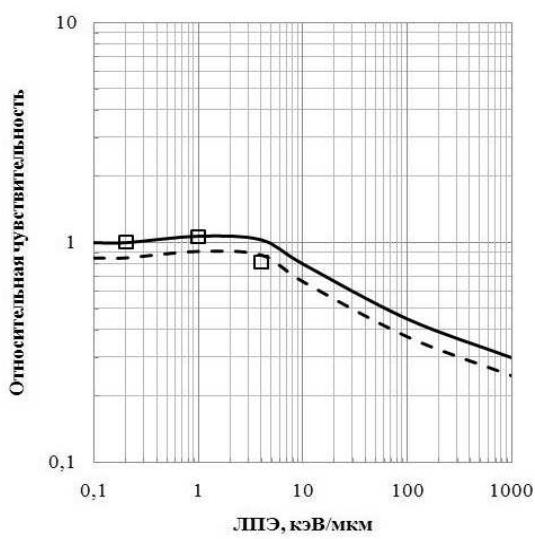


Рис. 12. Относительная зависимость чувствительности ТЛД -100 [5] (сплошная линия и пунктир – диапазон (с учетом погрешности)) и ДТГ-4 (квадраты) от ЛПЭ.

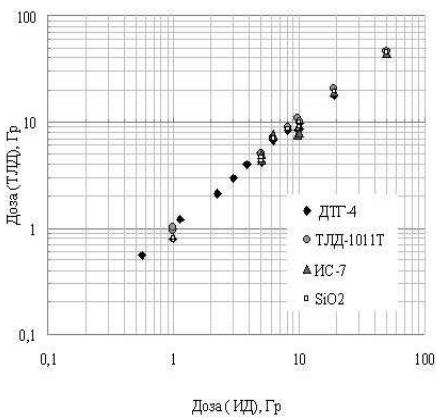


Рис. 13а. Показания ТЛД в зависимости от дозы протонов по показаниям ИД.

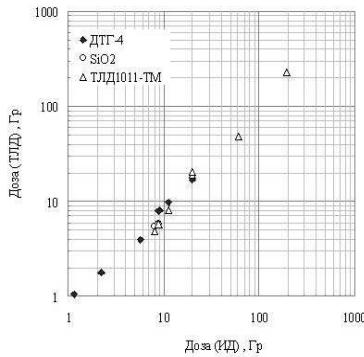


Рис. 13б. Показания ТЛД в зависимости от дозы дейtronов по показаниям ИД.

### Заключение

Выполненное исследование зависимости чувствительности ТЛД типа ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) показало:

- ДТГ-4 имеет сильное отклонение («сверхлинейность») от линейной зависимости от дозы при дозах выше 3...4 Гр. При этом параметры «сверхлинейности» зависят от значения ЛПЭ излучения. Полученные данные для ДТГ-4 в данной работе сходны с данными для ТЛД-100, полученными другими авторами [3, 5].
- У ТЛД-1011(Т) не наблюдается эффекта «сверхлинейности» независимо от величины ЛПЭ излучения, но при дозах выше 60..100 Гр наблюдается деградация чувствительности.
- При использовании ДТГ-4 в пучках легких ионов: а) верхний диапазон измерения доз ДТГ-4 составляет 20..30 Гр; б) при ЛПЭ частиц до 1..3 кэВ/мкм можно использовать поправку на «сверхлинейность», полученную с помощью гаммаизлучения, при ЛПЭ выше 4...5 кэВ/мкм необходимо учитывать, что поправка на «сверхлинейность» зависит от ЛПЭ.

- При использовании ТЛД-1011(Т) в пучках легких ионов: а) верхний диапазон измерений составляет до 100 Гр; б) поправку на деградацию чувствительности при дозах выше 50..60 Гр можно использовать из данных по гамма-излучению, по крайней мере для ионов с ЛПЭ до 5 кэВ/мкм.

Авторы приносят благодарность Ю.М. Антипову, Н.В. Анферову и коллективу И-100 за возможность выполнения и поддержку данной работы, О.И. Батухтиной (АЭХК) за ценные замечания.

### **Список литературы**

- [1] Ю.М.Антипов, Н.Е.Анферов, В.А.Батарин, А.В.Василевский, Ю.П.Горин, А.С.Гуревич, В.В.Давыдов, Ю.Г.Каршев, Г.Ф.Кузнецов, А.П.Мальцев, С.И.Пилипенко, В.И.Столповский, В.А.Тепляков, Е.Ф.Троянов, Н.Е.Тюрин, Ю.С.Федотов, Б.А.Фролов (ГНЦ ИФВЭ), В.П.Белов, А.Ю.Константинов, Б.В.Рождественский, Ю.П.Севергин, И.А.Шукейло (НИИЭФА), Ю.С.Дмитриенко, В.Е.Ключ, А.Г.Коноплянников, Ю.С.Мардынский, А.Ф.Цыб (МРНЦ). Работы по созданию центра протон-ионной лучевой терапии в ИФВЭ. – Препринт ИФВЭ 2001-52 ОУ У-70, Протвино, 2001.
- [2] Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Корякин С.Н., Хвостунов И.К., Цыб Т.С., Исаева Е.В., Малинова И.В., Баранов А.П., Комарова Е.В., Пятенко В.С., Коровчук О.Н., Цихмистер А.С., Потетня В.И., Рябченко Н.И., Антощина М. М., Солдатов А.П., Антипов Ю.М., Алексеев А.Г. Радиобиологические оценки импульсного протонного излучения ускорителя И-100. В печати, 2009.
- [3] Y. S. Horowitz, L. Oster, S. Biderman1 and Y. Einav. Localized transitions in the thermoluminescence of LiF : Mg,Ti: potential for nanoscale dosimetry. // J. Phys. D: Appl. Phys. **36** (2003), 446–459.
- [4] J.P. Biersack and J.F. Ziegler. STIM-98. (1998).
- [5] G. D. Badhwar, B.L. Cash, E. J. Semones, H. Yasuda, and K. Fujitaka. Relative Efficiency of TLD-100 to High Linear Energy Transfer Radiation – Correction to Astronaut Absorbed Dose. NASA Technical Report, 2004.

[6] В.Т.Головачик и И.А.Огарков. Исследования зависимости чувствительности радио-термolumинесцентных детекторов ИКС от ЛПЭ и дозы протонов. МИФИ, ГНЦ ИФВЭ, 1980. Пояснительная записка к дипломному проекту.

*Рукопись поступила 9 ноября 2009 г.*



А.Г. Алексеев, Н.А. Карпов  
Исследование термolumинесцентных дозиметров ДТГ-4 и ТЛД-1011(Т) для дозиметрии  
в пучках легких ионов.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 13.11.2009. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.  
Печ. л. 1,06. Уч.-изд. л. 1,7. Тираж 80. Заказ 55. Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

---

ПРЕПРИНТ 2009-18, ИФВЭ, 2009

---