

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 539.1.074+544.541+544.542.122

**ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ**

© 2021 г. Н. Л. Алукер^{a,*}, А. С. Артамонов^{b,**}, М. Herrmann^{c,***}

^a Кемеровский государственный университет
Россия, 650000, Кемерово, ул. Красная, 6

^b Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”
Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

^c Department of Meteorology and Atmospheric Science The Pennsylvania State University University Park,
PA 16802, United States

*e-mail: naluker@gmail.com

**e-mail: asartamonov1@mephi.ru

***e-mail: maria.herrmann@psu.edu

Поступила в редакцию 10.11.2020 г.

После доработки 22.11.2020 г.

Принята к публикации 24.11.2020 г.

Обосновано использование термолюминесцентных детекторов ионизирующего излучения ТЛД-К, изготавливаемых из аморфного материала на основе стекла, для контроля излучений высокой плотности и интенсивности, т.е. до доз 1 кГр по рабочему дозиметрическому пику, при мощностях дозы до 10^{11} Гр/с.

DOI: 10.31857/S0032816221020269

1. ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной проблемой при регистрации ионизирующих излучений (и.и.) является дозиметрия коротких импульсов, обеспечивающих высокие плотности возбуждения (мощности дозы) и соответственно дозы [1–4]. В основе этой сложной и не нашедшей до настоящего времени решения проблемы лежит следующее. Вероятность рекомбинации создаваемых импульсом возбуждения носителей заряда в общем случае подчиняется бимолекулярной кинетике, т.е. пропорциональна произведению концентраций рекомбинирующих партнеров [4, 5]. В случае твердотельных детекторов рекомбинирующими партнерами являются зонные, релаксированные или захватившиеся на дефекты или примеси электроны и дырки [4, 5]. При равенстве концентраций носителей заряда, что обычно реализуется при высоких плотностях возбуждения, вероятность рекомбинации оказывается пропорциональной квадрату концентрации созданных электронно-дырочных пар. Это приводит к тому, что в мощных полях и.и. кинетика процесса бимолекулярная и практически все типы детекторов оказываются нелинейными [6–9]. Вторая причина нелинейности связана с эффектами насыщения. Она до конца не выяснена, обусловлена, вероятно, малым разлетом первичных носителей заряда при

их больших концентрациях, их безызлучательной рекомбинацией, т.е. невозможностью создания большой концентрации отдельно локализованных электронов и дырок [4, 5].

Совместное действие этих двух факторов приводит к тому, что дозиметрия мощных импульсных пучков, в первую очередь мощных импульсов электронных ускорителей, остается проблематичной.

В чистых щелочно-галоидных кристаллах и ряде других активированных дозиметрических системах разделение зарядов осуществляется за счет разных пробега электронов и дырок до захвата. В кинетике могут наблюдаться процессы первого, второго и промежуточного характера, что приводит к сложной зависимости интенсивности термолюминесценции (т.л.) от дозы [5]. При низких плотностях возбуждения, до доз 0.5 Гр, часто достигается линейная зависимость интенсивности т.л. от дозы облучения, далее может наблюдаться сверхлинейность и выход на насыщение [5–9]. Поэтому в основном т.л.-детекторы применяются для регистрации дозовых нагрузок до 0.5 Гр [10–13].

Если конечной стадией возбуждения при рекомбинации является внутрицентровый переход (возбуждение примеси), то может наблюдаться чисто мономолекулярная кинетика процесса. Ес-

Таблица 1.

Технические характеристики	Данные испытаний
Температура максимума основного пика термовысвечивания при скорости нагрева 4 К/с	440 ± 5 К
Размеры детектора, мм	(3 × 3) ± 0.05
Толщина детектора, мм	0.5 ± 0.01
Масса детектора, мг	11 ± 0.2
Диапазон линейности доз по основному дозиметрическому пику, Гр	10 ⁻⁴ –10 ³
Эффективный атомный номер	12.8
Летучесть материала при нагреве	Отсутствует
Отношение чувствительности детектора в области рентгеновского излучения с эффективной энергией 30 кэВ к чувствительности при облучении ⁶⁰ Со	≤5
Высокая механическая прочность и химическая стойкость к воздействию агрессивных сред	+
Низкая растворимость в воде, возможность подвергаться стерилизации при медицинских исследованиях	+

ли ловушки расположены по соседству с центром люминесценции, а пробеги первичных носителей до захвата невелики (высокие интенсивности), тогда система (центр + ловушка) может рассматриваться как независимая, что также приводит к кинетике рекомбинации первого порядка [5].

Для аморфных материалов с сохранением только ближнего порядка (стекла) удастся достигнуть линейности интенсивности т.л. от дозы облучения в более широком диапазоне, чем для кристаллов [14–19]. Следовательно, в качестве перспективных детекторов импульсного и.и. высокой плотности и интенсивности могут рассматриваться именно стекла [14–19].

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований т.л.-детекторов излучения (ТЛД-К), изготовленных из материала на основе стекла и обеспечивающих линейную зависимость интенсивности т.л. от дозы облучения в широком дозовом диапазоне при разных плотностях и типах возбуждения [15, 17, 18].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Характеристики детекторов и считывающего оборудования. Характеристики облучения при аттестационных испытаниях

Отличительной особенностью детекторов ТЛД-К является чрезвычайно широкий диапазон линейности дозовой характеристики при определении доз от 10⁻⁴ Гр до 1 кГр [16, 17]. Современная отечественная т.л.-аппаратура без использования регулировки напряжения на фотоэлектронных умножителях не обеспечивает такой большой диапазон изменения интенсивностей. В связи с этим рассматриваются два варианта применения детекторов: первый – для индивидуального дозиметрического контроля и контроля окружающей среды, включая контроль в диагностической ме-

дицине (при дозах от 10⁻⁴ до 1 Гр); второй – для регистрации больших доз, включая определение поглощенных доз при импульсных воздействиях высокой плотности и интенсивности (0.1 Гр–10 кГр). Работа с большими дозами потребовала соответствующей настройки т.л.-установки ДТУ-01М, которую мы использовали в своих исследованиях (уменьшение напряжения на фотоумножителях, снижение скорости нагрева и увеличение температурного диапазона регистрации кривой термовысвечивания). Рабочий пик на кривой т.л. при скорости нагрева 4 К/с находится при 440 К. Расширение температурного диапазона регистрации т.л. позволило зарегистрировать при более высокой температуре (~600 К) пик т.л., при использовании которого в дозиметрии диапазон определения доз предполагается расширить до 10 кГр, однако это требует дополнительной проверки [15, 17, 18].

Основные характеристики детектора ТЛД-К приведены в табл. 1. Элементный анализ и состав материала описаны в [18].

На рис. 1 приведены энергетические зависимости интенсивности т.л. для детекторов разных типов, полученные на основе как собственных исследований, так и литературных данных [12, 17]. Следует отметить, что условия регистрации данных, приведенных на рис. 1, для разных систем разные. Детекторы ТЛД-500 и ТЛД-100 облучались в кассетах, а детекторы на основе стекла – без кассет.

На рис. 2 приведены результаты выполненного нами сравнения оптических спектров поглощения детекторов разных типов.

Детекторы на основе стекла в у.ф.-области непрозрачны и, как и детекторы на основе Al₂O₃, обладают сильным диффузным рассеиванием. В некоторых случаях удобно использовать дозиметр в виде прессованных порошковых таблеток. При

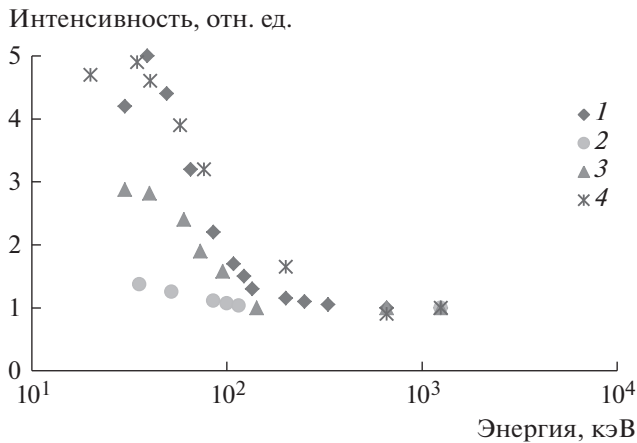


Рис. 1. Энергетические зависимости интенсивности т.л. относительно сигнала, регистрируемого при облучении изотопом ^{60}Co , для детекторов разных типов, облучаемых в кассетах и без кассет: 1 – детектор ПСТ (алюмофосфатное стекло); 2 – детектор ТЛД-100 (LiF) в кассете; 3 – детектор ТЛД-500 (Al_2O_3) в кассете; 4 – детектор ТЛД-К.

работе с порошкообразным дозиметрическим материалом важную роль играет размер зерна порошка. На рис. 3 приведена зависимость интенсивности сигнала т.л. для порошка детекторного материала ТЛД-К от его размерности при нормированной массе навески. Видно, что лучший выход т.л. наблюдается при радиусе зерна 0.5 мм, именно такой и выбрана толщина детектора. При меньших размерах зерна, в связи с возрастанием роли поверхности, выход падает, при больших размерах выход также падает до достижения постоянной величины.

Для т.л.-детекторов одним из определяющих свойств является способность сохранять информацию при их хранении после облучения. У всех исследованных детекторов спад интенсивности т.л. со временем (фединг) обнаруживается в первую минуту после облучения. У детекторов на основе Al_2O_3 и SiO_2 фединг за первые сутки после облучения может достигать 30% (рис. 4), а спустя сутки, годовая потеря информации не превышает 20%. Наилучшую способность сохранять информацию, по-видимому, имеет детектор на основе LiF, хотя и у него в первые сутки наблюдается фединг. Для детекторов ТЛД-500 при оценке фединга необходимо учитывать их сильную светочувствительность.

Для минимизации погрешностей лучший режим работы будет обеспечен, если измерения проводить через такое же, как и при калибровке, время после облучения ~1–3 дня. При необходимости проведения измерений после облучения раньше вышеуказанного времени необходимо вводить соответствующий коэффициент на фе-

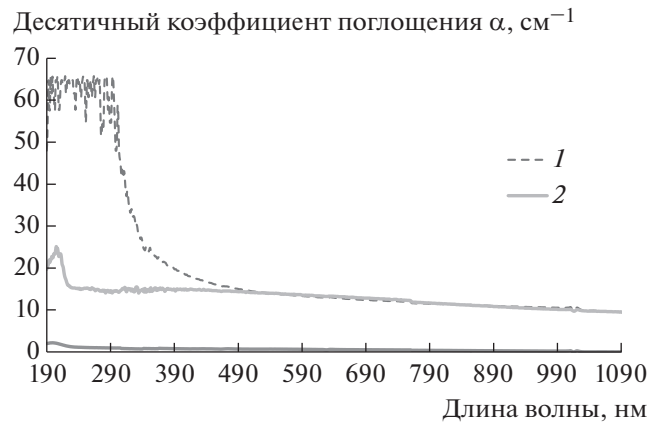


Рис. 2. Спектры поглощения детекторов разных типов: 1 – ТЛД-К; 2 – ТЛД-500 (Al_2O_3); 3 – ТЛД-100 (LiF).

динг. При облучении детектора ТЛД-К высокими дозами выявляется высокотемпературный (~600 К) пик т.л., фединг для которого меньше. Этот пик т.л. в принципе позволяет расширить пределы регистрации детектора в сторону больших доз и уменьшить неопределенность, вызванную федингом.

После регистрации детектором больших доз необходим более глубокий, чем обеспечиваемый стандартным блоком, отжиг детекторов перед повторным использованием – выдержка при температуре 720 К в течение нескольких часов.

Так как световыход люминесценции играет важную роль при измерениях т.л., нами изучены спектры фотолюминесценции и поглощения в диапазоне длин волн от 210 до 840 нм. Результаты приведены на рис. 5 и опубликованы в работе [18]. Согласно рис. 5, наблюдается короткая лю-

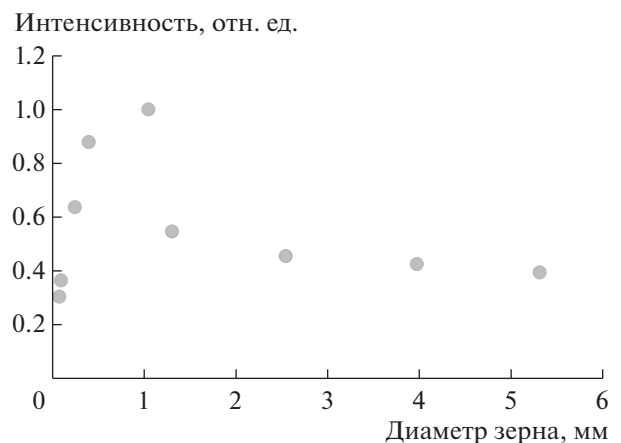


Рис. 3. Зависимость выхода т.л. порошкообразного материала детектора ТЛД-К от диаметра зерна порошка.

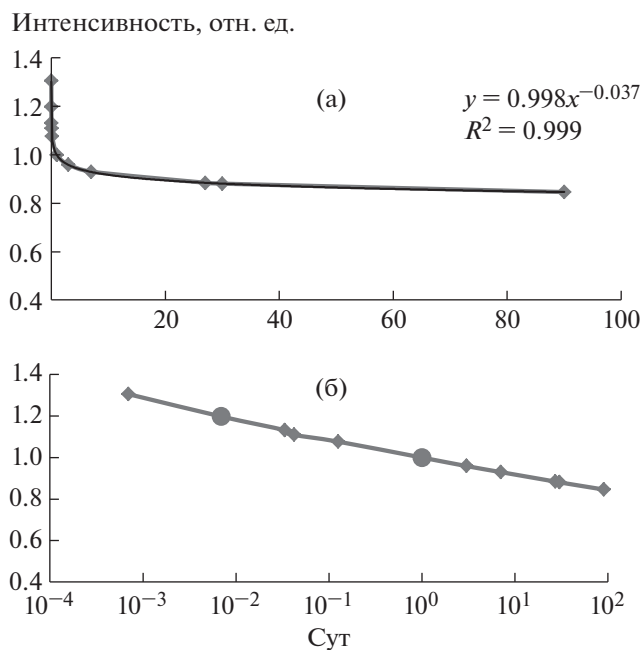


Рис. 4. а – спад интенсивности т.л. после облучения (фединг) детектора ТЛД-К; б – фединг детектора ТЛД-К в логарифмическом масштабе, круглыми точками отмечены 10 мин и 1 сут после облучения.

минесценция с временем затухания $\tau \leq 1$ мкс и максимумом в области 360–400 нм и слабая длительная люминесценция с $\tau \sim 100$ мкс с максимумами на длинах волн 500 и 700 нм. Вклады этих составляющих в т.л. с учетом времени высвечивания могут быть сравнимы.

Аттестационные испытания детекторов проводились в МНИРРИ, ВНИИМ и Environmental Measurements Laboratory (U.S. Department of Energy) в диапазоне доз 10^{-5} –10 Гр. Для аттестационной градуировки детекторов использовались следующие источники излучения: тормозное излучение 50 кВ (2 мм Al), 100 кВ (2 мм Al), 200 кВ (2 мм Cu); γ -излучение от образцовых облучателей ЛУЧ-1 (^{60}Co) и УПГД-1М (^{137}Cs и ^{60}Co); рентгеновское излучение с эффективной энергией 35–130 кэВ от образцового облучателя УЭД 50-250 с образцовым полем фонового воздействия источников ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{242}Am . Использовалась аттестованная дозиметрическая аппаратура ДТУ-01М, “Викторин-2800” Riso TL/OSL Reader TL-DA-15A. При аттестационных испытаниях проверка возможности регистрации более высоких доз не проводилась. В связи с этим в данной статье приводятся результаты таких исследований.

Работа по исследованию возможности регистрации детектором больших доз проводилась в стационарных условиях облучения проникающей радиацией (^{60}Co). Влияние высоких значений доз при их высоких мощностях исследова-

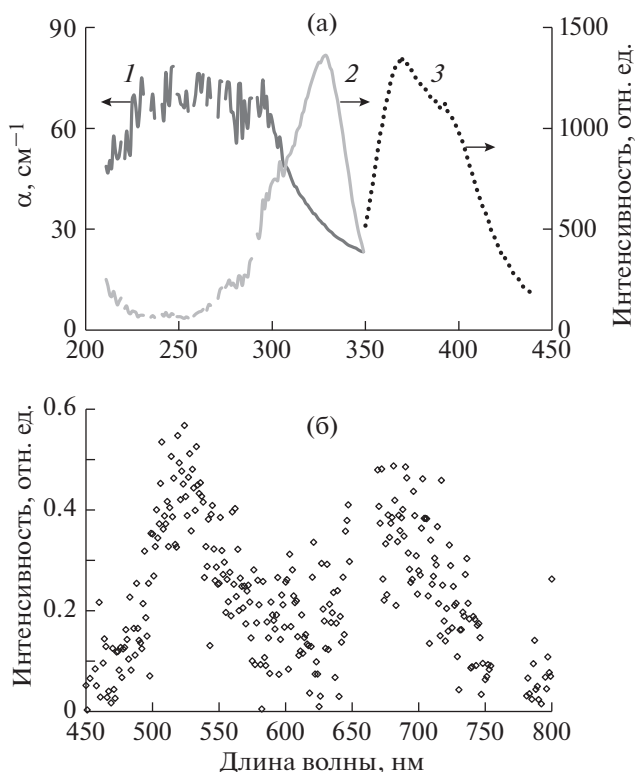


Рис. 5. а – спектры поглощения (1), возбуждения (2) и люминесценции (3) детектора ТЛД-К при воздействии импульсов возбуждения длительностью 1 мкс; б – спектр люминесценции детектора ТЛД-К спустя 500 мкс после воздействия вышеуказанных импульсов.

лось при возбуждении детекторов импульсами протонов и низкоэнергетических электронов нано- и пикосекундной длительности. Мощные импульсные источники возбуждения позволяют в макрообъеме образца реализовать плотность возбуждения, сравнимые с таковыми в треках тяжелых частиц, т.е. моделировать трудно реализуемые другим путем рекомбинационные процессы в треках, что чрезвычайно удобно для отработки специальных дозиметрических задач [5].

2.2. Результаты дозиметрии проникающего излучения при стационарном облучении большими дозами

Дозиметрический отклик детекторов ТЛД-К в области высоких доз при относительно невысоких мощностях дозы, ~ 1 –3 Гр/с, изучался после их облучения в боковых и центральном каналах радиохимической установки МХР- γ -20 (^{60}Co) и аналогичной ей установки в Санкт-Петербургском технологическом университете. Это позволило зарегистрировать дозовую зависимость в диапазоне от 1 Гр до 100 кГр (рис. 6). Согласно рисунку, до дозы 1.5 кГр наблюдается линейная зависимость интенсивности сигнала т.л. в рабо-

чем дозиметрическом пике от дозы облучения, при дозах ~ 2 кГр – выход на насыщение, а выше 6 кГр – небольшое падение интенсивности сигнала.

Аналогичная зависимость наблюдалась и при облучении тормозным излучением линейного ускорителя электронов “Электроника” с начальной энергией электронов 5 МэВ (мощность дозы до 10 Гр/с).

После получения соответствующей градуировки при помощи детекторов ТЛД-К проводилось изучение распределения дозного поля γ -установки (^{60}Co) “Исследователь”, ОАО “НИИПП”, г. Томск.

Во всех экспериментах для обеспечения более высокой надежности результатов исследования было выделено не менее четырех детекторов каждой дозой облучения. После каждого облучения большими дозами проводился глубокий отжиг детектора либо использовались новые детекторы. Дозы облучения определялись независимым способом по известной мощности дозы и с использованием временных зависимостей.

2.3. Результаты дозиметрии при высокоинтенсивном возбуждении электронами

Для изучения воздействия электронов при высоких плотностях облучения использовались ускорители конструкции Месяца–Ковальчука (максимальная энергия ускоренных электронов 0.35 МэВ, длительность импульса ~ 10 нс, плотность тока пучка от 0.1 до 10 кА/см²) и Месяца–Шпака с разрядником-обострителем для получения более коротких импульсов (длительность электронного импульса ~ 150 пс, плотность тока в пучке от 1 до 100 кА/см², максимальная энергия ускоренных электронов 0.2 МэВ). Форма импульса ускорителя наносекундного диапазона определялась прямым осциллографированием токового импульса ускорителя. Энергия пучка электронов, падающих на образец, измерялась колориметрическим методом с использованием датчика ИМО-2. Заряд электронного пучка, падающего на образец, измерялся цилиндром Фарадея.

При изменении амплитуд импульсов ускорителей в диапазоне $4 \cdot 10^{-9}$ – $2 \cdot 10^{-7}$ Кл/см² удалось зарегистрировать линейную зависимость интенсивности т.л. от интенсивности воздействия потока электронов. При выбранном режиме невысоких амплитуд импульса и варьирования дозы числом импульсов наблюдается линейная зависимость интенсивности т.л. и от числа импульсов облучения.

При воздействии импульсов наносекундной длительности со средней амплитудой $5 \cdot 10^{-8}$ Кл/см² (доза за импульс при этом ~ 0.3 кГр) дозовое насыщение наступает уже после трех-четырех импульсов (рис. 7а).

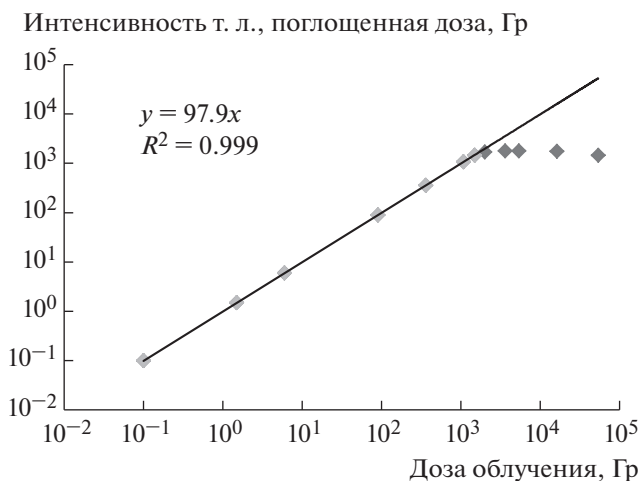


Рис. 6. Зависимость интенсивности т.л. (дозы) для детектора ТЛД-К в рабочем дозиметрическом пике от дозы при стационарном облучении ^{60}Co (мощность дозы ~ 3 Гр/с).

Мощность дозы в импульсе при амплитуде импульса $2 \cdot 10^{-7}$ Кл/см² (доза ~ 1000 Гр) составляет $\sim 10^{11}$ Гр/с. Максимальные интенсивности т.л. и дозы, при которых наблюдается насыщение сигнала, сравнимы с интенсивностями при стационарном режиме облучения ^{60}Co (см. рис. 4). Это позволяет заключить, что пучок электронов является достаточно расфокусированным, по крайней мере, на площади детектора 3×3 мм², а практический пробег электронов при энергии 350 кэВ в материале детектора сравним с толщиной детектора. Энергетический спектр ускоренных электронов оценивался путем микрофотометрирования слоя реперных кристаллов, окрашенных возбуждающим импульсом. При регистрации т.л.-сигнала в области насыщения основного дозиметрического пика в высокотемпературной области фиксируется более слабый пик, линейность от дозы для которого выполняется примерно до доз 10 кГр (см. рис. 7б).

Таким образом, при возбуждении импульсами электронов (350 кэВ) наносекундной длительности характер зависимости интенсивности сигнала детектора ТЛД-К от поверхностной плотности заряда за импульс и числа импульсов сохраняется аналогичным стационарному режиму возбуждения проникающим излучением. Плотности возбуждения при этом на много порядков выше, чем при стационарном возбуждении, мощность дозы достигает 10^{11} Гр/с. Как и при регистрации излучения при стационарном возбуждении, верхний предел дозы, регистрируемой детекторами ТЛД-К в рабочем пике при воздействии наносекундными импульсами электронов, ограничен величиной ~ 2 кГр. Однако за счет использования высоко-

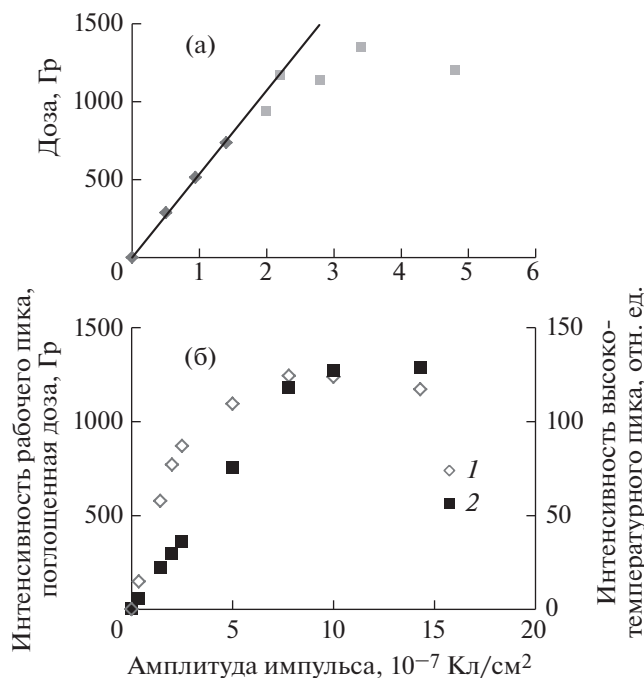


Рис. 7. а – зависимость поглощенной детектором ТЛД-К дозы от амплитуды импульса при воздействии импульсами электронов с $\tau \sim 10$ нс; б – зависимость интенсивности сигнала т.л. в рабочем пике (поглощенная доза) (1) и высокотемпературном пике (2) от амплитуды импульса в при воздействии импульсами электронов с $\tau \sim 10$ нс.

температурного пика предел регистрации дозы может быть увеличен на порядок.

В области насыщения интенсивности т.л.-сигнала рабочего пика поверхностный заряд составил $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/см², что при толщине слоя облучения ~ 0.025 см позволяет оценить величину предельной дозы как $D \sim 1000$ Гр.

При использовании в качестве источника возбуждения электронов с максимальными энергиями 200 кэВ пикосекундной длительности мы сталкиваемся с поглощением электронов только частью объема детектора, поскольку пробег электронов в материале детектора меньше его толщины (0.05 см), а пучок является сильно сфокусированным с диаметром пятна $\sim 1.1-1.3$ мм.

Истинная поглощенная доза D_0 и пропорциональная ей интенсивность т.л.-сигнала при неравномерном поглощении может быть представлена следующим выражением:

$$D_0 = D_{\text{изм}} \frac{l_d}{l_0}, \quad (1)$$

где l_d – толщина детектора, а l_0 – глубина пробега электронов.

Таким образом, в случае малой проникающей способности излучения (меньше толщины детек-

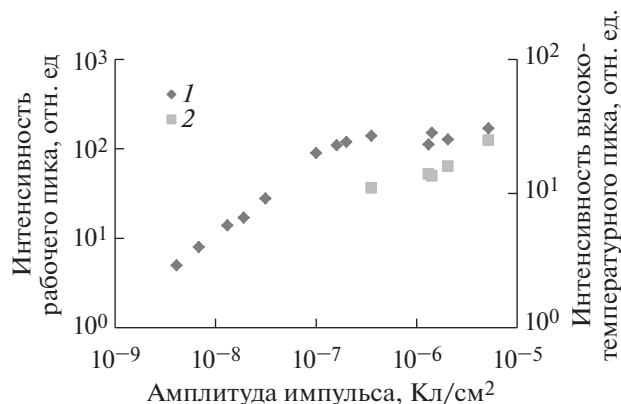


Рис. 8. Зависимости интенсивностей т.л.-сигнала, регистрируемого детектором ТЛД-К в рабочем (1) и высокотемпературном (2) пиках при воздействии импульсами электронов с $\tau \sim 150$ пс, от амплитуды импульса электронов.

тора) интенсивность т.л.-сигнала детектора занижается на коэффициент, определяемый соотношением между толщиной детектора и проникающей способностью излучения. В этом случае могут наблюдаться меньшие интенсивности т.л.-сигнала, т.е. как бы меньшие дозы, выход на насыщение сигнала при этом будет сохраняться при тех же значениях амплитуд импульса. Применение коэффициента (1), учитывающего различие объема (толщины) детектора и облучаемой области, обеспечит адекватную дозиметрию.

На рис. 8 приведена зависимость интенсивности т.л. в двух пиках от амплитуды импульса в широком диапазоне изменения параметров пучка, полученная при облучении импульсами электронов с $\tau \sim 150$ пс и энергией ≤ 200 кэВ. Сравнение рис. 7а и 8 показывает, что коэффициент “сшивки” составляет ~ 10 .

В диапазоне изменения переданного заряда $2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$ Кл/см² при пико-, наносекундном возбуждении наблюдается линейная зависимость интенсивности т.л. в основном пике как от числа импульсов облучения, так и от амплитуды импульса. До значения $5.2 \cdot 10^{-6}$ Кл/см² сохраняется линейность выхода т.л. для высокотемпературного пика.

Проведенные исследования показали возможность использования детекторов ТЛД-К даже для регистрации дозы достаточно слабопроникающего излучения при высоких интенсивностях и плотностях потока в пучке. Оценить поглощенную дозу по рабочему пику детектора можно до дозы 1 кГр, а по высокотемпературному – до 10 кГр.

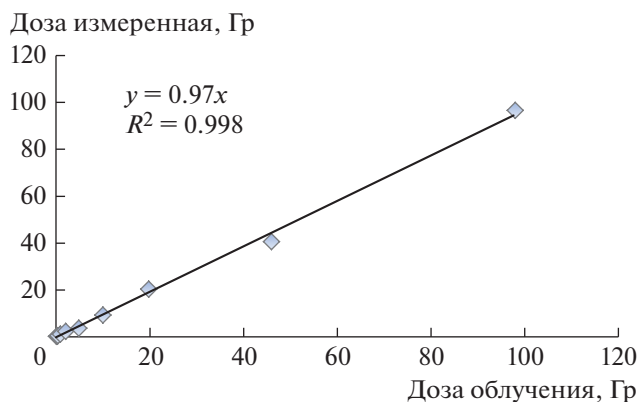


Рис. 9. Поглощенная детектором доза в зависимости от дозы, полученной при облучении протонами с начальной энергией 175 МэВ.

2.4. Результаты дозиметрии при импульсном возбуждении протонами с начальной энергией 175 МэВ

Возможность дозиметрии протонного воздействия изучалась при облучении протонами высоких энергий на синхротроне отдела медицинской физики ИГЭФ (длительность импульса 100 нс, доза в импульсе от 0.05 до 0.5 Гр, начальная энергия частиц 175 МэВ). Мощность дозы при облучении протонами варьировалась в пределах $5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$ Гр/с. Детектор имел слой половинного ослабления 0.122 г/см².

На рис. 9 приведены результаты, полученные при облучении протонами высоких энергий. До доз 100 Гр зависимость носит линейный характер и практически совпадает с зависимостями, приведенными выше для проникающего излучения. Облучение более высокими дозами, к сожалению, не проводилось.

На рис. 10 приведена зависимость нормированной поглощенной дозы от энергии протонного излучения. При облучении детекторы размещались внутри фантома из оргстекла на различных глубинах, что соответствовало изменению энергии протонов от 175 до 10 МэВ.

При изменении энергии протонов от 175 до 10 МэВ при торможении в фантоме увеличение интенсивности т.л.-сигнала (поглощенной дозы) в конце пути протонов коррелирует с изменением чувствительности при облучении γ - и рентгеновским излучением в области низких энергий (ход с жесткостью). При энергиях ниже 10 МэВ пробеги протонов в материале детектора становятся меньше толщины детектора, что требует дополнительных поправок на пробег.

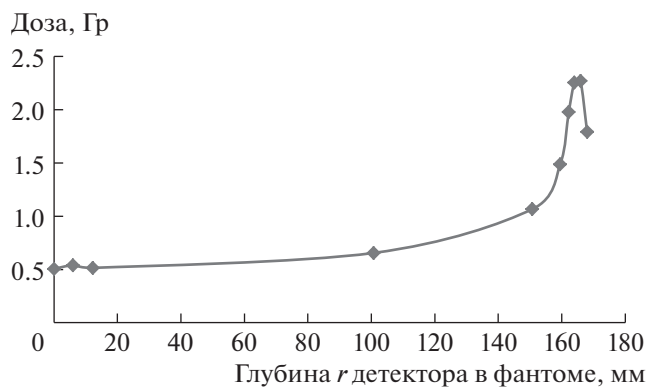


Рис. 10. Зависимость поглощенной дозы, отнесенной к дозе облучения на поверхности фантома, от глубины r расположения детектора в фантоме.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных данных для большинства активированных и преднамеренно неактивированных кристаллических детекторных материалов, результаты, полученные на ТЛД-К, оказались достаточно обнадеживающими. Используемый состав и режим термообработки применяемого материала детектора позволили реализовать случай вырождено бимолекулярной кинетики (кинетики псевдопервого порядка) и обеспечить регистрацию доз в существенно расширенном по сравнению с другими т.л.-детекторами диапазоне. Зависимости чувствительности детектора от плотности возбуждения до мощностей доз 10^{11} Гр/с не обнаружено. При низких энергиях электронов, обеспечивающих существенно неоднородное поглощение в материале детектора и регистрацию других слабопроникающих излучений, возможно занижение интенсивности т.л.-детектора (поглощенной дозы) [20–22].

Для работы со слабопроникающим излучением целесообразно уменьшение толщины детектора (см. рис. 3) [20–22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная дозиметрия. Электронные пучки с энергиями от 1 до 50 МэВ. Доклад 35 МКРЕ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Егер Р. Дозиметрия и защита от излучений. М.: Госатомиздат, 1961.
3. Микродозиметрия. Доклад 36 МКРЕ. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Алукер Э.Д., Гаврилов В.В., Дейч Р.Г., Чернов С.А. Быстропротекающие радиационно-стимулированные процессы в щелочно-галогенидных кристаллах. Рига: Зинатне, 1987. С. 183.
5. Антонов-Романовский В.В. Кинетика фотолуминесценции кристаллофоров. М.: Наука, 1966.

6. *McKeever S.W.S., Moscovitch M., Townsend P.D.* Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses. Ashford: Nuclear Technology Publishing, 1995.
7. *Непомнящих А.П., Раджабов Е.Л., Егранов А.В.* Центры окраски и люминесценция кристаллов LiF. Новосибирск: Наука, 1984.
8. *Аксельрод М.С., Кортюв В.С., Мильман И.И., Горелова Е.А., Борисов А.А., Затуловский Л.М., Кравецкий Д.Я., Березина И.Е., Лебедев Н.К.* // Известия АН СССР. Серия физическая. 1988. Т. 52. № 10. С. 1981.
9. *Кортюв В.С., Мильман И.И., Никифоров С.В.* // Физика твердого тела. 1997. Т. 39. № 9. С. 1538.
10. IAEA, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, № GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2015 (in Russian).
11. Организация и проведение индивидуального дозиметрического контроля. Персонал медицинских учреждений. Методические указания (МУ 2.6.1.3015-12). М.: Минздрав России, 2012.
12. *Шлеенкова Е.Н.* // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7. № 3. С. 39.
13. *Vanhavere F., Carinou E., Domienik J., Donadille L., Ginjaume M., Gualdrini G., Koukorava C., Krim S., Nikodemova D., Ruiz Lopez N., Sans-Mercü M., Struelens L.* // Radiation Measurements. November 2011. V. 46. Issue 11. P. 1243.
14. *Бочвар И.А., Гимадова Т.И., Кеирим-Маркус И.Б., Кушнерев А.Я., Якубик В.В.* Метод дозиметрии ИКС. М.: Атомиздат, 1977.
15. *Алукер Н.Л., Алукер Э.Д.* А.с. № 2108598 РФ, МПК G01T1/11, C09K11/08 // БИ. 1998. <http://www.find-patent.ru/patent/210/2108598.html>
16. *Гимадова Т.И., Шахс А.И., Семенов А.В., Васильев И.О.* // АНРИ. 2001. Вып. 3 (26). С. 20.
17. *Алукер Н.Л., Артамонов А.С., Бакулин Ю.П., Данилович Е.Н., Крысанова О.Л., Рискина Р.В., Согоян А.В.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2006. № 3–4. С. 86.
18. *Алукер Н.Л., Суздальцева Я.М., Herrmann M.E., Дулепова А.С.* // ПТЭ. 2016. № 5. С. 115. <https://doi.org/10.7868/S0032816216050025>
19. *Raitzig M., Goodband Rachel J., Schuster C., Harling T.* // Technisches Messen. 2016. V. 83. P. 171.
20. ГОСТ 34157-2017 Руководство по дозиметрии при обработке пищевых продуктов электронными пучками и рентгеновским (тормозным) излучением (с поправками). Межгосударственный стандарт МКС 67.040. Дата введения 2019.02.01.
21. *Бакулин Ю.П., Баранов В.П., Данилович Е.Н., Яшин С.Н.* // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2010. Вып. 4. С. 104.
22. *Иванов С.И., Логинова С.В., Аكوпова Н.А., Охрименко С.Е., Нурлубаев К.Н.* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2014. Т. 59. № 4. С. 67.