

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.8

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОГО ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ

©2026 г. П. В. Зубарев<sup>a</sup>, А. Н. Квашнин<sup>a</sup>, В. В. Поросев<sup>a,b,\*</sup>, С. Ю. Таскаев<sup>a,b</sup>,  
В. А. Хильченко<sup>a</sup>, С. В. Щукин<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера*

*Сибирского отделения Российской академии наук*

*Российская Федерация, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>b</sup> *Новосибирский государственный университет*

*Российская Федерация, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

*\*e-mail: porosev@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 07.11.2025 г.

После доработки 08.11.2025 г.

Принята к публикации 13.01.2026 г.

С появлением источников нейтронов на базе ускорителей для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) возникла необходимость создания независимой системы измерения генерируемого потока частиц. Для этой цели в ИЯФ СО РАН был разработан быстрый детектор нейтронов на базе сцинтиллятор–оптоволоконно–микрорексельный лавинный фотодиод, использующий три различных датчика, что позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать локальную дозу, наведенную гамма-излучением. Система детектирования оптических сигналов на основе кремниевых фотоумножителей обладает высокой квантовой эффективностью, а применение счетного режима регистрации событий позволило достичь уровня собственных шумов порядка нескольких десятков отсчетов в секунду. При этом счетная характеристика электроники регистрации хорошо описывается непродлевающим мертвым временем  $24.6 \pm 0.1$  нс, что позволяет регистрировать события с минимальными просчетами даже при высокой загрузке детектора.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Бор-нейтронозахватная терапия представляет собой метод избирательного уничтожения клеток злокачественных опухолей посредством облучения их тепловыми и эпитепловыми нейтронами, при котором в опухолевых клетках предварительно накапливается бор –  $^{10}\text{B}$ . Тепловые нейтроны взаимодействуют с  $^{10}\text{B}$  и приводят к гибели этих клеток за счет большого

локального энерговыделения образующихся  $\alpha$ -частиц и ядер  ${}^7\text{Li}$ . При этом вследствие малого пробега образующихся частиц, окружающие нормальные клетки получают минимальные повреждения. Для исследования методики БНЗТ в Институте ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера был создан ускорительный источник нейтронов ВИТА, который состоит из электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц, литиевой нейтроногенерирующей мишени и системы формирования потока эпитепловых нейтронов [1]. Высокая планируемая интенсивность разрабатываемых ускорительных источников нейтронов привела к необходимости создания нового поколения сопутствующего диагностического оборудования. В частности, ожидаемый поток генерируемых эпитепловых нейтронов составляет около  $109 \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  [2].

Для контроля стабильности параметров ускорителя в ИЯФ СО РАН был разработан быстрый детектор нейтронов (БДН). Датчики данного детектора, каждый из которых содержит три независимых оптических канала регистрации, имеют одинаковую конструкцию. Первый канал основан на сцинтилляторе СЦ-331 с бором, второй на основе сцинтиллятора СЦ-301 без бора и третий – оптоволокно без сцинтиллятора. Сцинтилляторы на основе полистирола имеют время высвечивания около 2 нс и изготавливаются в Институте физики высоких энергий ИФВЭ, г. Протвино [3]. Чувствительный элемент датчика представляет собой цилиндр диаметром 1 мм и длиной 1 мм. Малый размер сцинтилляторов позволяет уменьшить регистрируемый поток до уровня нескольких миллионов событий в секунду. Свет от сцинтилляторов передается по кварцевым световодам к считывающей электронике, а регистрация оптических импульсов осуществляется с помощью охлаждаемых микропиксельных лавинных фотодиодов (SiPM) AFBR-S4K33C0135L (Broadcom). Сигнал с выхода SiPM усиливается и поступает на входы компараторов и далее попадает на счетчики импульсов. Число зарегистрированных событий за 10 мс передается в компьютер для дальнейшей обработки. Разница в отчетах датчиков с бором и без бора позволяет оценить вклад нейтронной компоненты, а разность отсчетов в канале детектора без бора и числа событий, зарегистрированных в канале без сцинтиллятора, дает сигнал, пропорциональный дозе гамма-излучения в точке измерения, поскольку позволяет исключить вклад черенковского излучения, образующегося в оптоволокне.

## 2. СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Первая версия системы регистрации детектора была разработана на основе специализированных микросхем для работы с микропиксельными лавинными фотодиодами OMEGA EASIROC (в новой версии CITIROC) [4]. Несмотря на успешное применение данного детектора для измерения параметров, генерируемого на установке потока нейтронов [5],

система обладала рядом существенных недостатков. В частности, интегральное исполнение схемы аналогового формирования импульсов не учитывает характеристик подключаемых к ее входам микропиксельных лавинных фотодиодов, что приводит к неоптимальному формированию импульсов, к искажению импульсов больших амплитуд и, как следствие, к формированию большого мертвого времени – не менее 50 нс. Кроме того, эти микросхемы в настоящее время коммерчески не доступны. На рис. 1 показаны характерные формы импульсов на выходе биполярного формирователя микросхемы СІТІRОС. Для устранения перечисленных выше недостатков была разработана новая версия системы регистрации, в которой используется формирование импульсов с замещением константы времени, обусловленной временем перезарядки ячеек микропиксельного лавинного фотодиода около 40 нс, меньшим по величине значением, равным примерно 15 нс. На рис. 2 показан фрагмент блок-схемы системы регистрации, а на рис. 3 – характерная форма импульса до и после усилителя-формирователя. Применение схемы активного восстановления постоянной составляющей и пассивного формирования однополярных импульсов с помощью цепочки  $R-LR$  позволило существенно повысить быстродействие регистрирующей электроники. Наличие двух компараторов, подключенных к выходу формирователя в каждом канале, позволяет выбрать порог регистрации, зависящий от подключенного к данному каналу типа сцинтиллятора.

**Рис. 1.** Форма импульса на выходе биполярного формирователя микросхемы СІТІRОС.

**Рис. 2.** Фрагмент блок-схемы аналоговой обработки сигнала детектора БДН.

**Рис. 3.** Форма импульса до (1) и после (2) схемы формирования детектора БДН.

Эффективная ширина импульса определяет мертвое время системы регистрации, которое приводит к тому, что измеренные скорости счета импульсов будут ниже реальных. Это искажает статистические распределения зарегистрированных событий. Тем не менее истинная скорость счета может быть восстановлена при известных параметрах системы. Измеренная скорость счета  $R$  определяется по формуле  $R = N e^{\lambda(-N\tau)}$  для системы с продлевающим мертвым временем  $\tau$  входным (истинным) потоком  $N$  и по формуле  $R = N / (1 + N\tau)$  для системы с непродлевающим мертвым временем.

Для определения типа системы используется тот факт, что форма распределения интервалов времени между зарегистрированными импульсами для этих двух случаев различается [6]. Так, плотность вероятности распределения интервалов для непродлевающего мертвого времени описывается простой формулой:

$$f(t) = \theta(t - \tau) N e^{-N(t-\tau)},$$

в то время как для продлевающего мертвого времени она описывается более сложным выражением [7, 8]:

$$f(t) = N \sum_{j=1}^{\infty} \theta(t - j\tau) \frac{(-N(t - j\tau))^{j-1}}{(j-1)!} e^{-jN\tau}$$

и имеет характерное искажение формы в максимуме распределения.

### 3. МЕРТВОЕ ВРЕМЯ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ

Определение величины мертвого времени системы регистрации проводилось в процессе облучения датчиков на ускорительном источнике нейтронов и при облучении рентгеновским излучением. При облучении нейтронами максимальный поток событий составлял примерно  $4 \cdot 10^5$  отсчетов в секунду, что определялось параметрами действующего ускорителя. Для достижения больших по величине регистрируемых потоков использовалась рентгеновская трубка при напряжении 95 кВ и установленном добавочном фильтре Си толщиной 0.3 мм. В процессе измерения с помощью цифрового осциллографа Tektronix DPO3032 проводилась запись осциллограмм на выходе компараторов с шагом по времени 2 нс и длиной выборки 1 000 000 точек при различной интенсивности облучения детектора. На основе полученных данных формировались гистограммы распределений интервалов между событиями и их аппроксимация аналитическими выражениями, откуда определялось мертвое время системы и величина входного потока. Пример такого распределения представлен на рис. 4. На этом же рисунке показаны результаты аппроксимации экспериментальных данных аналитическими выражениями для двух типов мертвого времени – продлевающего и непродлевающего. На рисунке видно, что в распределениях интервалов между событиями мы не наблюдаем характерного плато в интервале от  $\tau$  до  $2\tau$ , которое должна присутствовать в распределениях для систем с продлевающим мертвым временем. Среднее значение непродлевающего мертвого времени, полученное из эксперимента, составляет  $24.6 \pm 0.1$  нс. На рис. 5 представлена зависимость скорости счета детектора БДН от величины входного потока. Для сравнения представлены данные для “идеального” детектора и результаты аппроксимации экспериментальных данных формулой, описывающей счетную характеристику детектора с непродлевающим мертвым временем, равным 24.6 нс. Сравнительный анализ показывает, что просчеты электроники не превышают 20 % при входном потоке до  $10^7$  отсчетов в секунду и то, что для восстановления величины “истинного” потока достаточно скорректировать измеренные значения, основываясь на величине мертвого времени.

**Рис. 4.** Распределение интервалов времени между событиями и результат аппроксимации данных выражениями для непродлевающего и продлевающего мертвого времени.

**Рис. 5.** Зависимость скорости счета детектора от входной загрузки...

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты измерения быстродействия новой системы регистрации быстрого детектора нейтронов, который планируется использовать на ускорительном источнике нейтронов ВИТА в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина. Реализация схемы формирования импульсов с учетом времени перезарядки ячеек микропиксельных лавинных фотодиодов позволила существенно повысить быстродействие регистрирующей электроники, по сравнению с использованным ранее аналогом на основе специализированных микросхем. На основе измерений, проведенных на действующей установке в ИЯФ СО РАН, распределения интервалов между импульсами хорошо описываются непродлевающим мертвым временем  $24.6 \pm 0.1$  нс, что позволяет регистрировать события с минимальными просчетами даже при высокой интенсивности входных событий и использовать это значение для восстановления величины “истинного” потока событий на детектор.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taskaev S., Berendeev E., Bikchurina M., et al.* // *Biology*. 2021. V. 10. №. 5. P. 350. <https://doi.org/10.3390/biology10050350>
2. International Atomic Energy Agency, *Advances in Boron Neutron Capture Therapy, Non-serial Publications, IAEA, Vienna. 2023.* [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CRCP-BOR-002\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/CRCP-BOR-002_web.pdf)
3. *Бритвич Г.И., Васильченко В.Г., Гилицкий Ю.В. и др.* // *ПТЭ*. 2004. № 5. С. 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17757053>  
[*Britvich G.I., Vasil'chenko V.G., Gilitsky Yu.V. et al.* // *ИЕТ*. 2004. 47. P. 571. <https://doi.org/10.1023/B:INET.0000043862.12092.b0>]
4. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., Makarov A.N., Porosev V.V., Savinov G.A., Shchudlo I.M., Taskaev S.Yu.* // *J. Instrum.* 2019. V. 14. P. P12002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/12/P12002>
5. *Bykov T.A., Kasatov D.A., Koshkarev A.M., et al.* // *J. Instrum.* 2021. V. 16. P. P10016. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10016>
6. *Müller J.W.* // *Nucl. Instrum. Meth.* 1973. V. 112. №. 1-2. P. 47. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90773-8](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90773-8)

7. *Pomme S., Denecke B., Alzetta J.-P.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 1999. V. 426. P. 564. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(99\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(99)00016-9)
8. *Pomme S.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 1999. V. 437. P. 481. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(99\)00791-3](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(99)00791-3)

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Форма импульса на выходе биполярного формирователя микросхемы СІТІRОС.
- Рис. 2.** Фрагмент блок-схемы аналоговой обработки сигнала детектора БДН.
- Рис. 3.** Форма импульса до (1) и после (2) схемы формирования детектора БДН.
- Рис. 4.** Распределение интервалов времени между событиями (точки) и результат аппроксимации данных выражениями для непродлевающего (штриховая кривая) и продлевающего (сплошная кривая) мертвого времени.
- Рис. 5.** Зависимость скорости счета детектора от входной загрузки для идеального детектора без просчетов (штриховая линия) и детектора БДН (сплошная линия). Показаны результаты изменений с нейтронами (черные квадраты) и рентгеновскими фотонами (кружки).

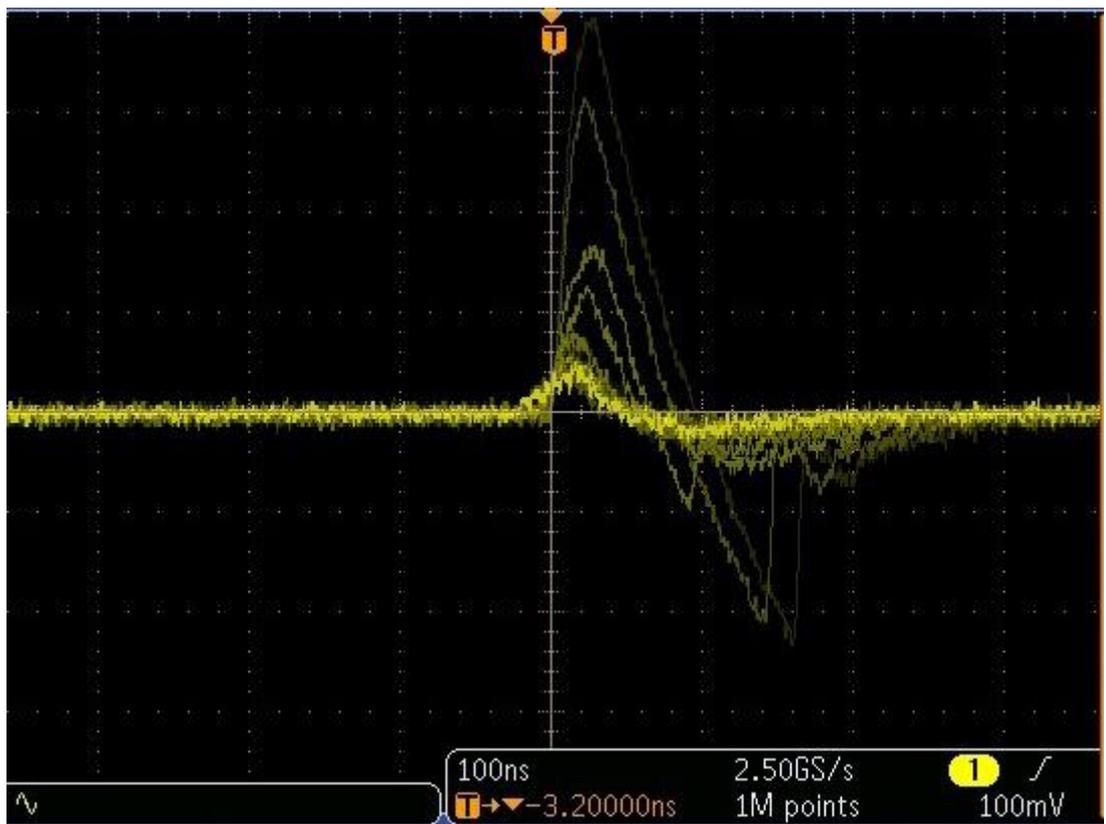


Рис. 1.

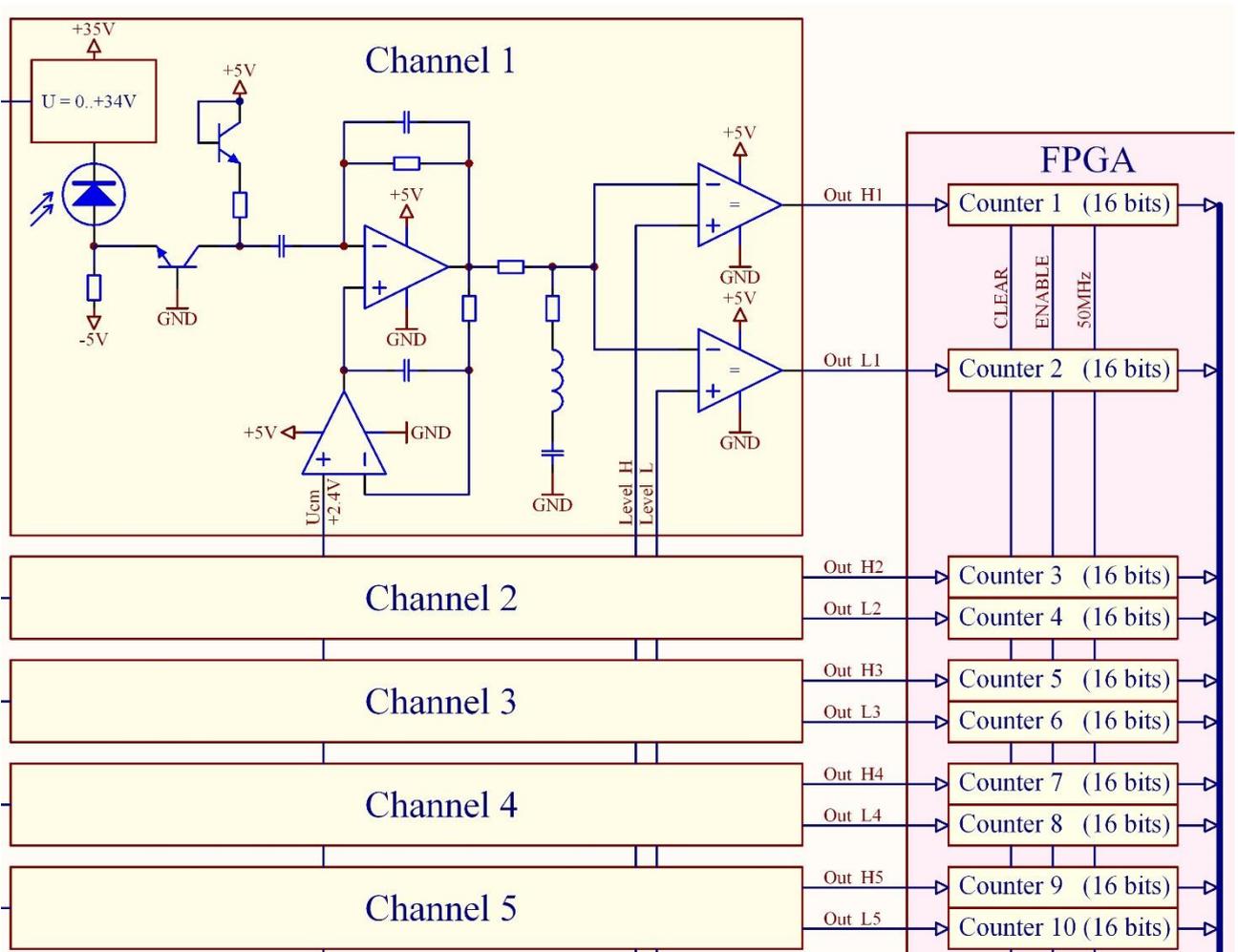


Рис. 2.

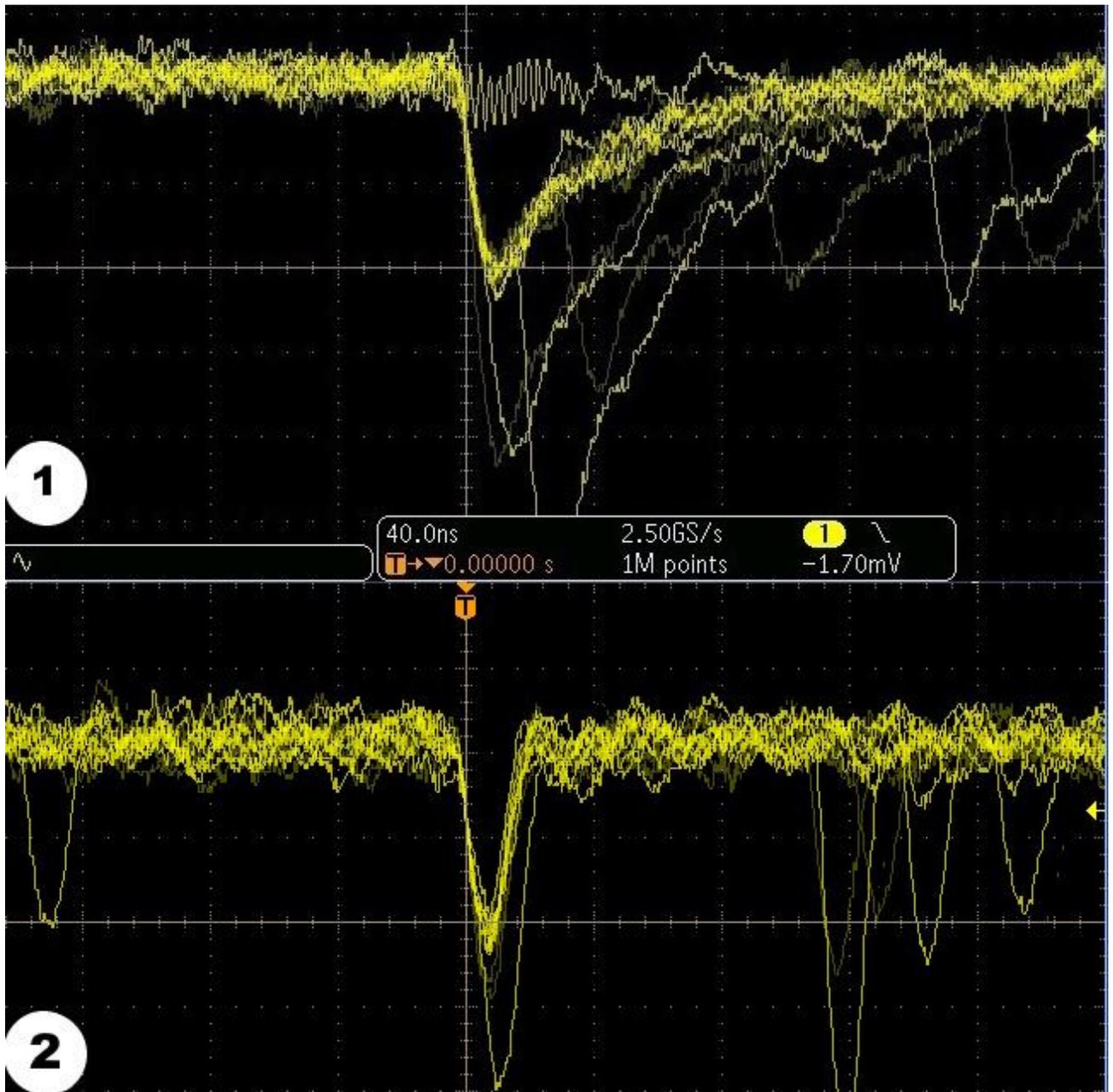


Рис. 3.

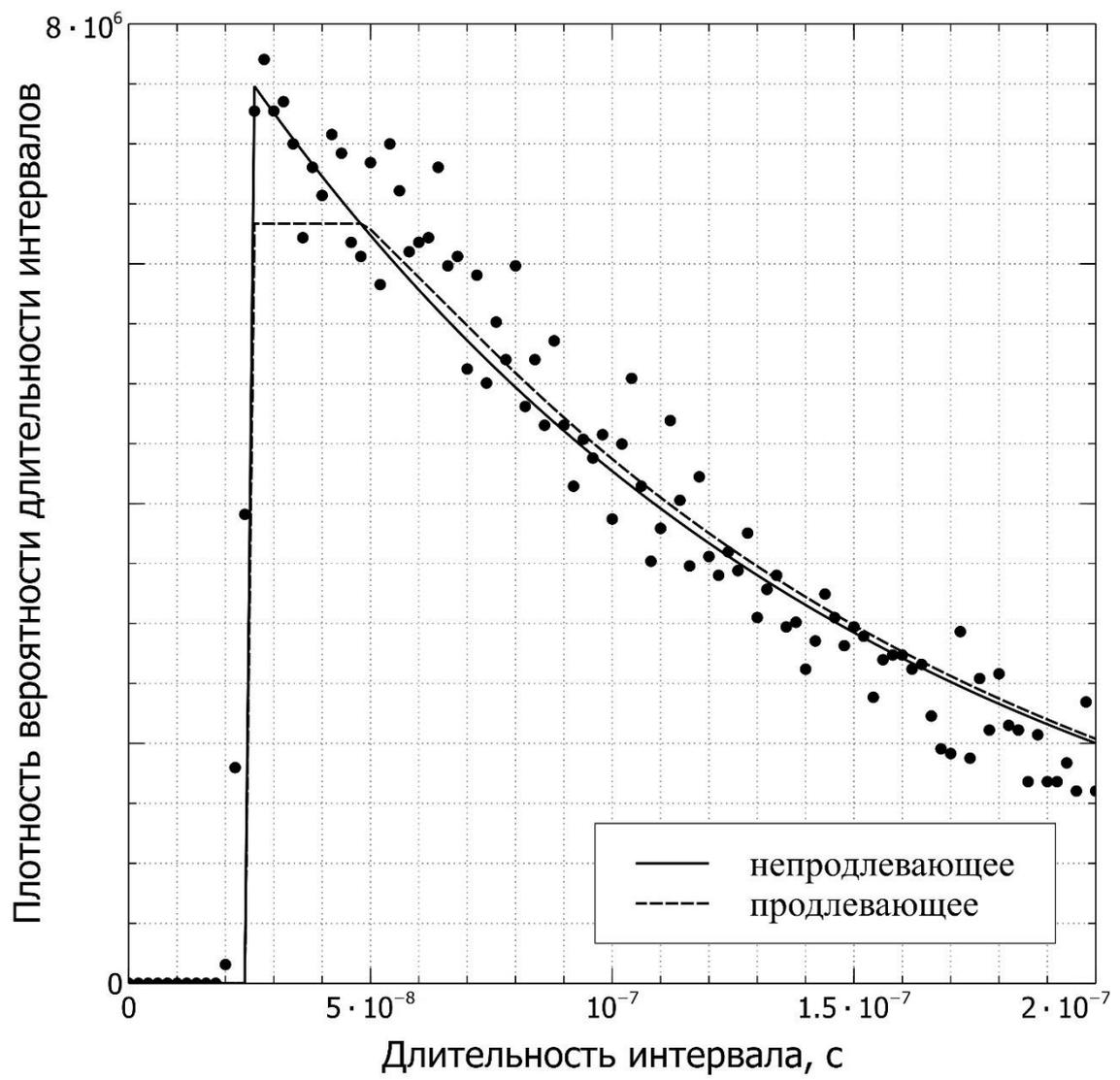


Рис. 4.

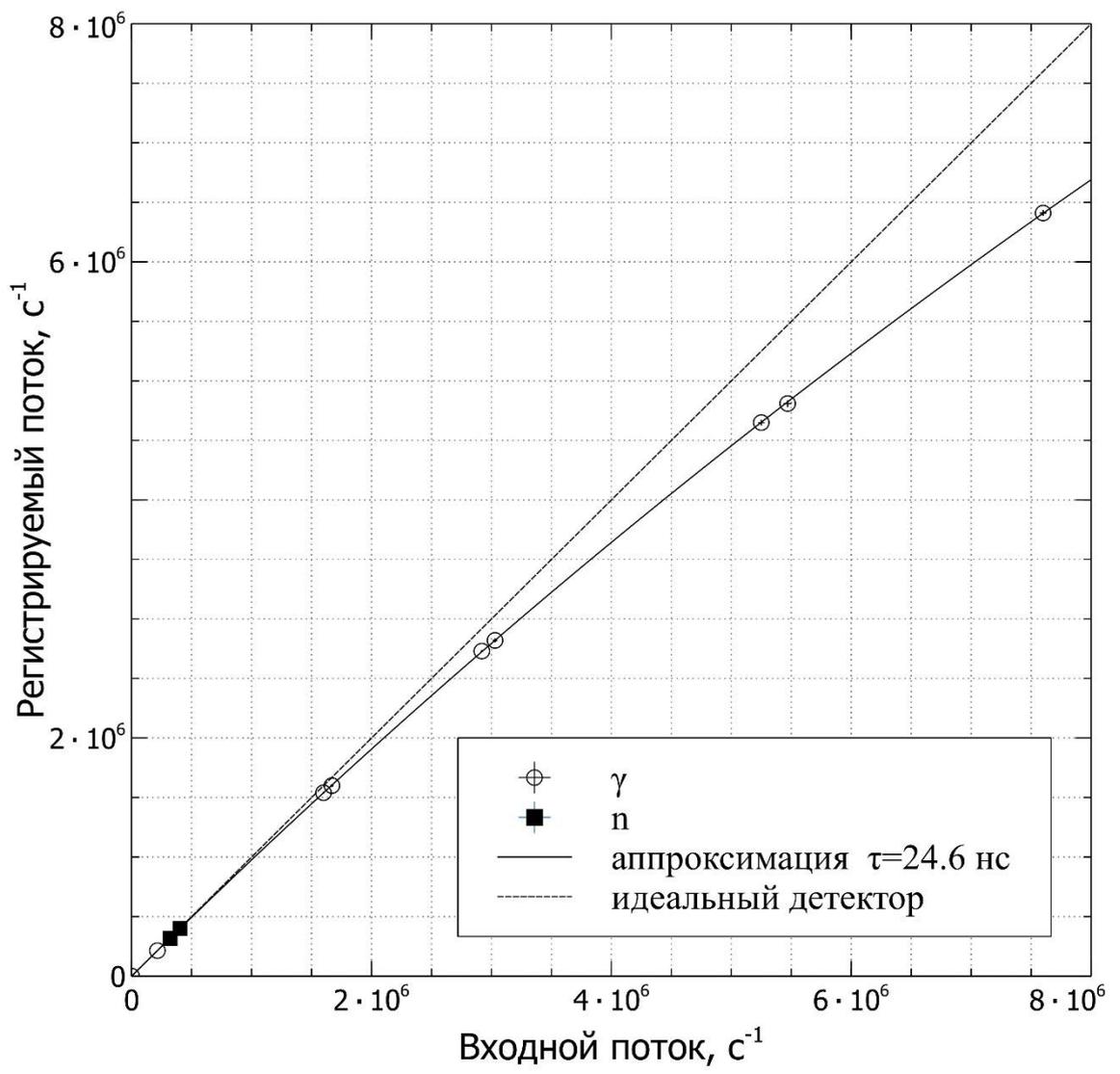


Рис. 5.