

**ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 539.1.074.2

**ДВА РЕЖИМА РАБОТЫ ГАЗОВОГО ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО  
СЧЕТЧИКА ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ СОБЫТИЙ**

**©2026 г. А. В. Копылов\*, И. В. Орехов, В. В. Петухов, А. Е. Соломатин**

*Институт ядерных исследований Российской академии наук*

*Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а*

*\* e-mail: kopylov@inr.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2025 г.

После доработки 18.02.2026 г.

Принята к публикации 05.03.2026 г.

Представлены результаты калибровки мультикатодного пропорционального счетчика, предназначенного для регистрации одноэлектронных событий в экспериментах по поиску скрытых фотонов темной материи. Исследованы два режима работы счетчика: классический однолавиный режим, описываемый распределением Полюа, и многолавиный режим с распределением Пуассона. Показано, что нанесение свежего полиуретанового лака на внутренние поверхности с последующей немедленной откачкой приводит к увеличению амплитуды импульсов на два порядка и переходу к многолавиному режиму. Эффект исчезает только после длительного контакта лака с воздухом и последующей откачки. Оба режима используются в экспериментальной практике для повышения надежности детектирования.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Мультикатодный пропорциональный счетчик был разработан для поиска частиц темной материи, в частности скрытых фотонов, путем регистрации одиночных электронов, эмитируемых с поверхности катода [1, 2]. Конструкция счетчика и его работа в деталях изложены в работе [3]. В настоящей работе исследованы два принципиально разных режима работы детектора: однолавиный режим, при котором один первичный электрон вызывает одну лавину вблизи анода и многолавиный режим, при котором один первичный электрон генерирует несколько последовательных лавин.

Оба режима представляют практический интерес для экспериментов по регистрации одноэлектронных событий.

## 2. КЛАССИЧЕСКИЙ РЕЖИМ: ОДНОЛАВИННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ

В базовой конструкции счетчик работал в режиме однократного лавинообразования. Спектр амплитуд импульсов от одиночных электронов аппроксимировался распределением Поля [4]:

$$P(A) = C(A/\bar{A})^\theta e^{-(1+\theta)A/\bar{A}},$$

здесь  $C$  – нормировочная константа,  $\theta$  и  $\bar{A}$  – параметры распределения Поля,  $A$  – амплитуда импульса.

Характерные амплитуды на выходе зарядочувствительного предусилителя составляли несколько десятков милливольт при пороге регистрации 3 мВ (рис. 1). При этом шумы на его выходе были на уровне 400 мкВ. Максимум спектра находился ниже порога регистрации (рис. 2), что вносило неопределенность в оценку эффективности детектирования.

**Рис. 1.** Осциллограмма импульсов от одиночных электронов

**Рис. 2.** Спектр импульсов от одиночных электронов.

## 3. МНОГОЛАВИННЫЙ РЕЖИМ В УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Нанесение свежего полиуретанового лака на контактные поверхности с немедленной откачкой привело к качественному изменению работы счетчика:

- амплитуда импульсов увеличилась примерно в 100 раз (ср. рис. 1, 3),
- произошел переход от однократного к многократному лавинообразованию,
- спектры амплитуд стали описываться распределением Пуассона (рис. 4).

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики режимов

Параметр	Однолавиновый режим	Многолавиновый режим
Распределение	Поля	Пуассона
Среднее число лавин	1	5–7.5
Типичная амплитуда	Единицы – десятки мВ	Сотни мВ – единицы В
Положение максимума	Ниже порога	Выше порога

Рост напряжения на катоде центрального счетчика от 1380 до 1400 В увеличивал среднее число лавин от 5 до 7.5, а средняя амплитуда одноэлектронного импульса на выходе

предусилителя возрастала примерно до 3 В, что свидетельствует об увеличении эффективного коэффициента газового усиления (КГУ) приблизительно до  $4 \cdot 10^7$ .

#### 4. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ИСЧЕЗНОВЕНИЯ ЭФФЕКТА

Критическим параметром для наблюдения эффекта является отсутствие контакта свежего лака с воздухом перед откачкой:

– эффект наблюдается при выполнении условий: свежий лак → немедленная откачка → заполнение рабочей смесью,

– эффект исчезает при выполнении условий: свежий лак → длительный контакт с воздухом → откачка → заполнение рабочей смесью.

Это указывает на определяющую роль легколетучих компонентов лака (вероятно, изоцианатов TDI, MDI), которые испаряются в рабочий объем при отсутствии предварительного окисления на воздухе и создают в объеме счетчика парогазовую среду, изменяющую процессы лавинообразования. При длительном контакте с воздухом они окисляются, так как обладают высокой реакционной способностью, в особенности с кислородом, и поэтому теряют активность. По этой причине сразу после нанесения лака счетчик откачивался с помощью турбомолекулярного насоса на протяжении двух суток для удаления всех летучих компонентов лака. После этого счетчик заполнялся газовой рабочей смесью неона и 10% метана в качестве гасящей добавки. Если пятно свеженанесенного лака выдерживается на воздухе в течение суток и лишь потом начинается откачка счетчика, то эффект не наблюдается. С метаном TDI и MDI не взаимодействуют, поэтому рабочая смесь счетчика не портится со временем. Это аргумент в пользу того, что именно эти добавки ответственны за наблюдаемый эффект. Давление насыщенных паров TDI около 0.01 мм рт.ст., для MDI – менее 0.001 мм рт.ст. при температуре 25 °С. При нанесении полиуретанового лака нужно иметь в виду, что масса нанесенного лака должна быть достаточной, чтобы обеспечить содержание паров этой примеси во всем объеме счетчика. В нашем эксперименте объем счетчика составлял примерно 15 л. Площадь лакового покрытия была примерно 10 см<sup>2</sup>, толщина покрытия составляла доли миллиметра. Этого оказалось достаточно для того, чтобы стабильная работа счетчика продолжалась более, чем полгода. В настоящее время измерения в таком режиме работы продолжаются. Нам удалось воспроизвести этот режим работы еще на одном счетчике объемом также примерно 15 л. При этом лаковое покрытие в этом случае наносилось на отдельную поверхность вне рабочего объема счетчика. Площадь покрытия была примерно такой же величины (порядка 10 см<sup>2</sup>) и такой же толщины. Результат оказался аналогичным: увеличение КГУ более, чем на два порядка, и продолжительная (более полугодом) стабильная работа счетчика. По результатам

этой работы мы оформили патент на изобретение [5]. Мы не изучали, каков конкретно механизм множественной генерации лавин в этом случае, это тема отдельного исследования. В процессе длительных измерений мы не получили каких-либо указаний на возможную сорбцию примесей на рабочих поверхностях счетчика. Рабочие характеристики не менялись значительно при длительной эксплуатации счетчика. Этот опыт может быть рекомендован исследователям, использующим газовые пропорциональные счетчики для счета одиночных электронов как простой и надежный способ увеличить коэффициент газового усиления более, чем на два порядка. Осциллограмма на рис. 3 и калибровочные спектры на рис. 4 наглядно иллюстрируют это. Здесь замечательным является сам факт того, что возможен нестандартный многолавиный режим работы счетчика с коэффициентом газового усиления на два порядка выше, чем в стандартном однолавином режиме.

**Рис. 3.** Осциллограмма одноэлектронных импульсов на счетчике усовершенствованной конструкции

**Рис. 4.** Спектры одноэлектронных импульсов для потенциала на катоде центрального счетчика

## 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБОИХ РЕЖИМОВ

В экспериментальной практике используются оба режима работы: однолавиный используется как референсный при калибровке и обеспечивает стабильность характеристик, а многолавиный применяется для повышения эффективности регистрации при поиске редких событий.

Возможность выбора между этими двумя режимами позволяет оптимизировать работу детектора в зависимости от геометрии счетчика и от экспериментальных задач.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что мультикатодный счетчик может работать в двух принципиально разных режимах: классическом однолавином режиме с распределением Поля и многолавином режиме с распределением Пуассона.

Переход между режимами контролируется предысторией полиуретанового покрытия: эффект многократного усиления наблюдается только при нанесении свежего лака с последующей немедленной откачкой. Усовершенствованная конструкция позволяет увеличить амплитуду импульсов на два порядка и повысить эффективность регистрации одноэлектронных событий.

Оба режима находят применение в экспериментах по поиску скрытых фотонов темной материи.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках “Программы обновления приборной базы” по государственному проекту “Наука”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2018. V. 910. P. 164. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.075>
2. *Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V.* // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2019. V. 7. P. 8. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/07/008>
3. *А.В. Копылов, И. В. Орехов, В.В. Петухов, А.Е. Соломатин* // ПТЭ. 2025. №1. С. 10. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82690223>  
[*Kopylov A., Orekhov I., Petukhov V., Solomatin A.E.* // Inst. Exp. Tech. 2025. V. 68. P. 7. <https://doi.org/10.1134/S0020441225700149> ]
4. *Alkhazov G.D.* // Nucl. Instrum. Methods. 1970. V. 89. P. 155. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(70\)90818-9](https://doi.org/10.1016/0029-554X(70)90818-9)
5. *Копылов А.В., Петухов В.В.* РФ Патент 2850412, 2025.

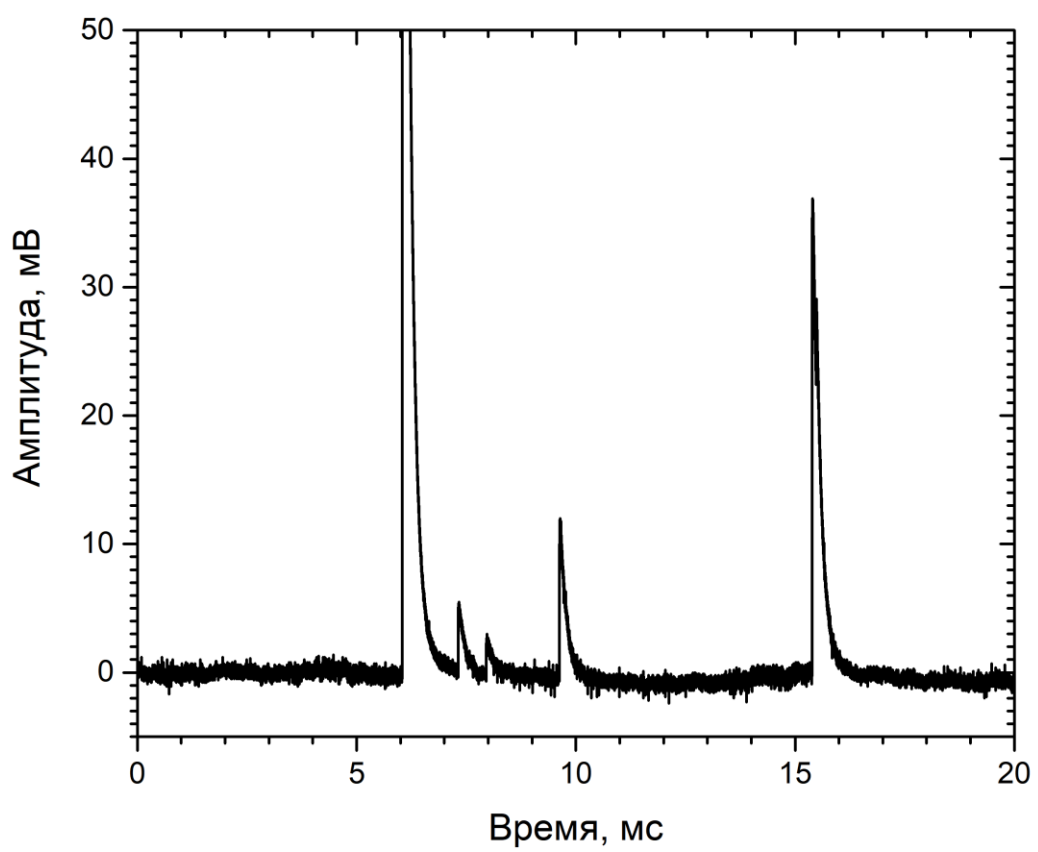
## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Осциллограмма импульсов от одиночных электронов.

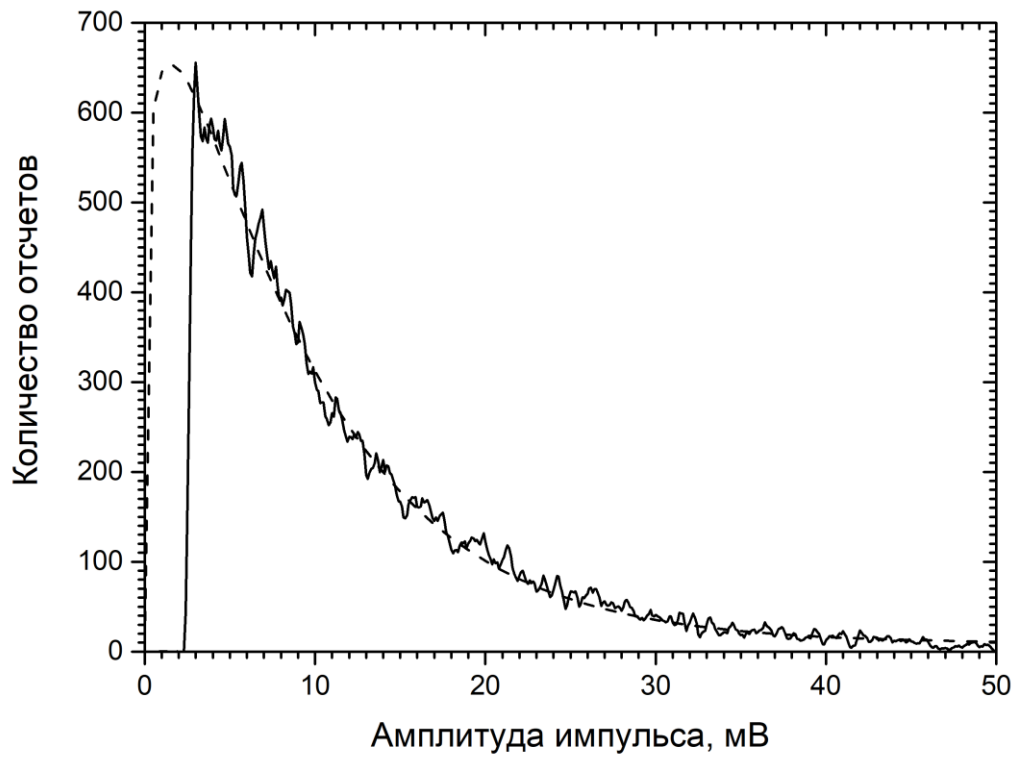
**Рис. 2.** Спектр импульсов от одиночных электронов. Штриховой линией показано распределение Поля.

**Рис. 3.** Осциллограмма одноэлектронных импульсов на счетчике усовершенствованной конструкции.

**Рис. 4.** Спектры одноэлектронных импульсов для потенциала на катоде центрального счетчика напряжением 1380 В (1), 1390 В (2) и 1400 В (3). Тонкой линией показано аппроксимирующее распределение Пуассона для среднего числа лавин 5 (1), 6 (2) и 7.5 (3).



**Рис.1**



**Рис.2**

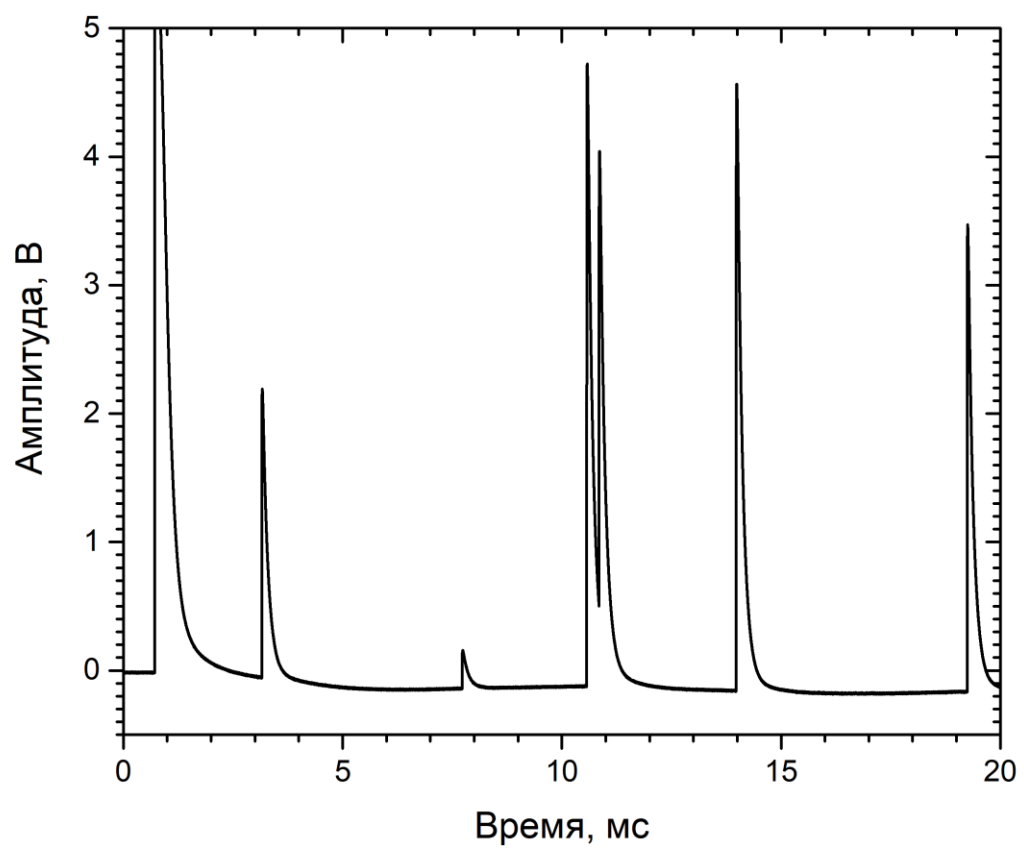


Рис.3

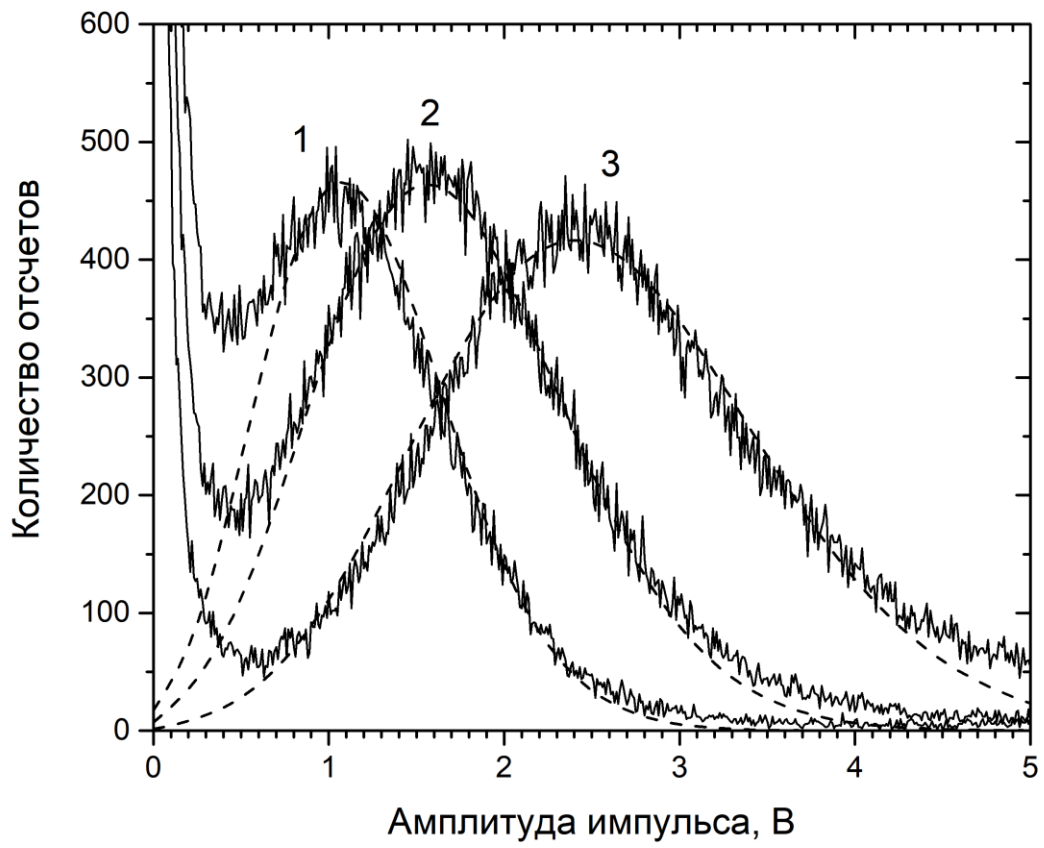


Рис.4