

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074

ЭЛЕКТРОННЫЙ ШУМ, ГЕНЕРИРУЕМЫЙ КОСМИЧЕСКИМИ МЮОНАМИ В ДВУХФАЗНОМ КСЕНОНОВОМ ЭМИССИОННОМ ДЕТЕКТОРЕ РЭД-100

© 2023 г. Д. Ю. Акимов^a, И. С. Александров^{a,b}, В. А. Белов^{c,a}, А. И. Болоздыня^{a,*}, А. А. Васин^a,
А. В. Галаванов^{d,a}, Ю. В. Гусаков^{d,a}, А. Г. Коваленко^{c,a}, Е. С. Козлова^{a,c}, А. М. Коновалов^a,
В. Н. Корноухов^{a,e}, А. В. Кумпан^a, А. В. Лукьяшин^a, А. В. Пинчук^a, О. Е. Разуваева^{a,c}, Д. Г. Рудик^a,
Г. Е. Симаков^{c,a}, В. В. Сосновцев^a, А. В. Хромов^{a,b}, А. В. Шакиров^a, А. В. Этенко^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (Московский инженерно-физический институт)
Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

^bНациональный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 30

^cНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики
Россия, 117218, Москва, ул. Большая Черемуштинская, 25

^dОбъединенный институт ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^eИнститут ядерных исследований РАН
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

*e-mail: aibolozdynya@mephi.ru

Поступила в редакцию 06.08.2022 г.

После доработки 06.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Показано, что рабочий объем двухфазного эмиссионного детектора РЭД-100, работающего в условиях наземной лаборатории и использующего жидкий ксенон в качестве рабочего вещества, является источником одноэлектронных шумовых сигналов с характерной частотой ~200 кГц. Обсуждаются возможные механизмы генерации шумов такого рода и методы их подавления.

DOI: 10.31857/S0032816223010020, EDN: PUPGPP

1. ВВЕДЕНИЕ

Технология применения двухфазных эмиссионных детекторов, использующих сжиженные благородные газы в качестве рабочего вещества, для регистрации элементарных частиц за 50 лет своего развития продемонстрировала большой потенциал для постановки экспериментов по поиску редких взаимодействий и событий с малыми энергосвечениями вплоть до одиночных ионизационных электронов. Изобретатели этого метода предлагали использовать его для создания управляемых трековых детекторов частиц высоких энергий [1], и первый действующий эмиссионный детектор применялся для визуализации треков релятивистских частиц в ускорительном эксперименте [2, 3]. Развитие этой технологии для электронной позиционно-чувствительной регистрации пространственного распределения γ -источников в ядерной медицине [3] привело к созданию на основе такого подхода “бесстеноч-

ных” детекторов, применяемых в экспериментах по поиску темной материи, регистрации нейтрино и исследованию других редких процессов с малыми энергосвечениями [4]. Все лучшие результаты по поиску во Вселенной темной материи в виде массивных слабовазаимодействующих частиц за последние 20 лет получены с помощью именно этой технологии [5]. Двухфазная эмиссионная камера РЭД-100, использующая жидкий ксенон в качестве рабочего вещества, экспонировалась в 2021–2022 гг. на Калининской АЭС с целью наблюдения упругого когерентного рассеяния реакторных электронных антинейтрино на тяжелых ядрах [6].

Высокая чувствительность эмиссионных детекторов к одиночным электронам ставит важную задачу исследования природы одноэлектронных (single electron – SE) шумов, характерных для детекторов такого типа. Впервые SE-сигналы наблюдались в стримерной эмиссионной камере при исследовании обнаруженных в ускорительном

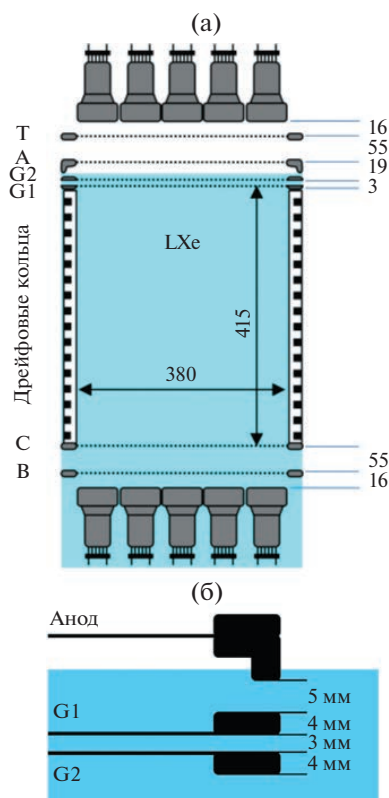


Рис. 1. Эмиссионный детектор РЭД-100: **а** — система считывания сцинтилляционных и электролюминесцентных сигналов с помощью двух матриц из 19-ти ФЭУ Hamamatsu R11410-20 и электродной системы, включающей сетчатые катод С и анод А, экранирующие заземленные сетки Т и В и электронный затвор (сетки G1 и G2); **б** — схема взаимного расположения сетчатых электродов для считывания электролюминесцентных сигналов, характерные размеры указаны в миллиметрах [6].

эксперименте треков с аномально низкой плотностью ионизации [7]. Было показано, что наблюдаемые прибором аномальные треки — это изображения треков релятивистских частиц с нормальной плотностью ионизации, зарегистрированных ранее на том же месте. Возникновение треков с аномально низкой плотностью ионизации явилось следствием того, что часть электронов ионизации при эмиссии нормального трека оказывается захваченной потенциальным барьером на границе раздела фаз. При подаче следующего высоковольтного импульса визуализации небольшая часть этих электронов, еще не захваченных электроотрицательными примесями, вытягивается из рабочей среды (твердого криптона), формируя “бледное” изображение предыдущего трека, которое выглядит как трек частицы с плотностью ионизации на несколько порядков ниже, чем у нормальной релятивистской частицы.

В эмиссионных камерах для регистрации тоечно-подобных событий SE-шум представляет

большую опасность как возможный источник ложных сигналов в случае поиска событий с малым ионизационным выходом. Важно отметить, что, согласно наблюдениям коллаборации LUX [8], захваченные под поверхностью раздела фаз электроны иногда эмитируют локализованными группами — так называемая “e-burst emission”. Этот эффект антикоррелирован с содержанием примесей в жидком ксеноне, т.е. чем чище ксенон, тем чаще эмиссия происходит не в виде относительно равномерно распределенного вдоль поверхности раздела фаз SE-шума, состоящего из одиночных электронов, а в виде локализованных всплесков, состоящих из групп в несколько электронов. Возможным механизмом такой эмиссии может быть гравитационная нестабильность заряженной поверхности раздела фаз в сильном локальном электрическом поле, создаваемом группой электронов, прижимаемых к поверхности раздела фаз внешним электрическим полем (детальное обсуждение такого механизма электронной эмиссии приведено, например, в [9], стр. 40).

В данной работе обсуждаются результаты наблюдения SE-шума, генерируемого космическими мюонами в эмиссионном детекторе РЭД-100 [10], работающем в наземной лаборатории и снабженном электронным затвором [11]. Наличие электронного затвора позволяет разделить эффекты поверхностной и объемной генерации SE-шумов.

2. ДЕТЕКТОР РЭД-100 С ЭЛЕКТРОННЫМ ЗАТВОРОМ

Двухфазный эмиссионный детектор РЭД-100 отличается от других современных эмиссионных детекторов тем, что оборудован электронным затвором, сформированным сетчатыми электродами (G1 и G2, как показано на рис. 1). Эта особенность позволяет экспонировать детектор в условиях наземной лаборатории с повышенным фоном от космических лучей. При прохождении через детектор космического мюона по сцинтилляционному триггеру на период времени порядка времени собирания электронов из рабочего объема детектора (≈ 250 мкс) между электродами G1 и G2 создается нулевая разность потенциалов так, что ионизационные электроны из рабочего объема детектора не доходят до поверхности раздела фаз и собираются на электроде G2. При этом поверхность раздела фаз не загружается неэмитируемыми электронами из потока электронов, вытягиваемых из рабочего объема, и не генерируется чрезвычайно интенсивный электролюминесцентный сигнал, который способен ограничить ресурс фотокатодов фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Форма металлического кольца, поддерживающего анодную сетку, выбрана такой, чтобы обеспечить эффективное собирание отри-

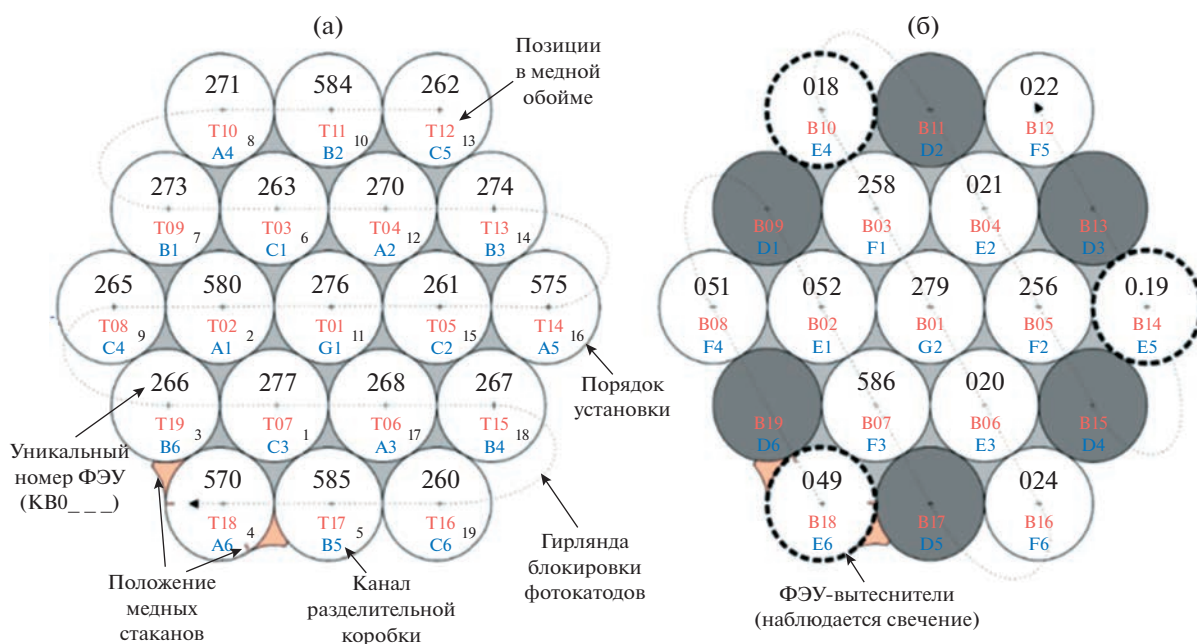


Рис. 2. Карта расположения ФЭУ Hamamatsu R11410-20 в верхней (а) и нижней (б) матрицах считывания детектора РЭД-100 с указанием номеров ФЭУ.

цательных зарядов, захваченных потенциальным барьером под поверхностью раздела фаз (см. рис. 1б).

Для регистрации сцинтилляционных и электролюминесцентных сигналов в РЭД-100 используются криогенные фотоэлектронные умножители Hamamatsu R11410-20, карта расположения которых представлена на рис. 2. SE-сигнал выглядит как компактная (~ 2 мкс) электролюминесцентная вспышка, регистрируемая верхней матрицей ФЭУ, в которой количество зарегистрированных фотоэлектронов (single photo-electron – SPE) составляет в среднем $\langle \text{SPE} \rangle = 28 \pm 6$ (см. рис. 3б).

3. SE-ШУМ ПРИ ОТКЛЮЧЕННОМ РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ

Исследование SE-сигналов в детекторе РЭД-100 начиналось при отключенном рабочем объеме. При этом катод и управляющие электроды (G1 и G2 на рис. 1) заземлялись, разность потенциалов между анодом и электродом G1 составляла ≈ 8 кВ, а напряженность электрического поля в газовом электролюминесцентном зазоре $E_{\text{EL}} \approx 5.3$ кВ/см. Запись сигнала осуществлялась по случайному триггеру. Записывались все сигналы в промежутке времени длительностью 275 мкс перед сцинтилляционным сигналом, вызывающим срабатывание триггера. Из записанных поканальных осциллограмм SE-сигналы выделялись как изолированные (> 500 нс до ближайшего соседнего импульса) SPE-кластеры, содержащие не менее 6 SPE-импульсов, регистрируемых во всей верхней матри-

це ФЭУ. Распределение по длительности отобранных таким образом сигналов представляет собой пик с максимумом в районе ≈ 2 мкс (см. рис. 3б), что совпадает с характерным временем электролюминесценции в РЭД-100, которое определяется временем дрейфа электронов через газовый электролюминесцентный зазор.

В условиях наземной лаборатории в отсутствие дрейфового поля в рабочем объеме детектора частота наблюдаемых SE-сигналов составляла $f_0 \sim 10$ кГц или $(1-2)\text{SPE}/250$ мкс [12]. Эти сигналы связаны с радиационным фоном, регистрируемым в слое жидкого ксенона толщиной ~ 10 мм между сетчатым электродом G1 и поверхностью раздела фаз ксенона (см. рис. 1), и шумом от спонтанной эмиссии электронов, задержанных потенциальным барьером под поверхностью раздела фаз.

4. SE-ШУМ, ГЕНЕРИРУЕМЫЙ В РАБОЧЕМ ОБЪЕМЕ ДЕТЕКТОРА ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

На следующем этапе исследования одноэлектронных сигналов анализировались их характеристики при работе детектора в режиме, когда включены электрические поля и в рабочем объеме детектора (~ 200 В/см), и в электролюминесцентном зазоре (~ 5.3 кВ/см).

Основная по энерговыделению на одно событие загрузка детектора, работающего в условиях наземной лаборатории, обусловлена космогенными мюонами, которые пересекают объем де-

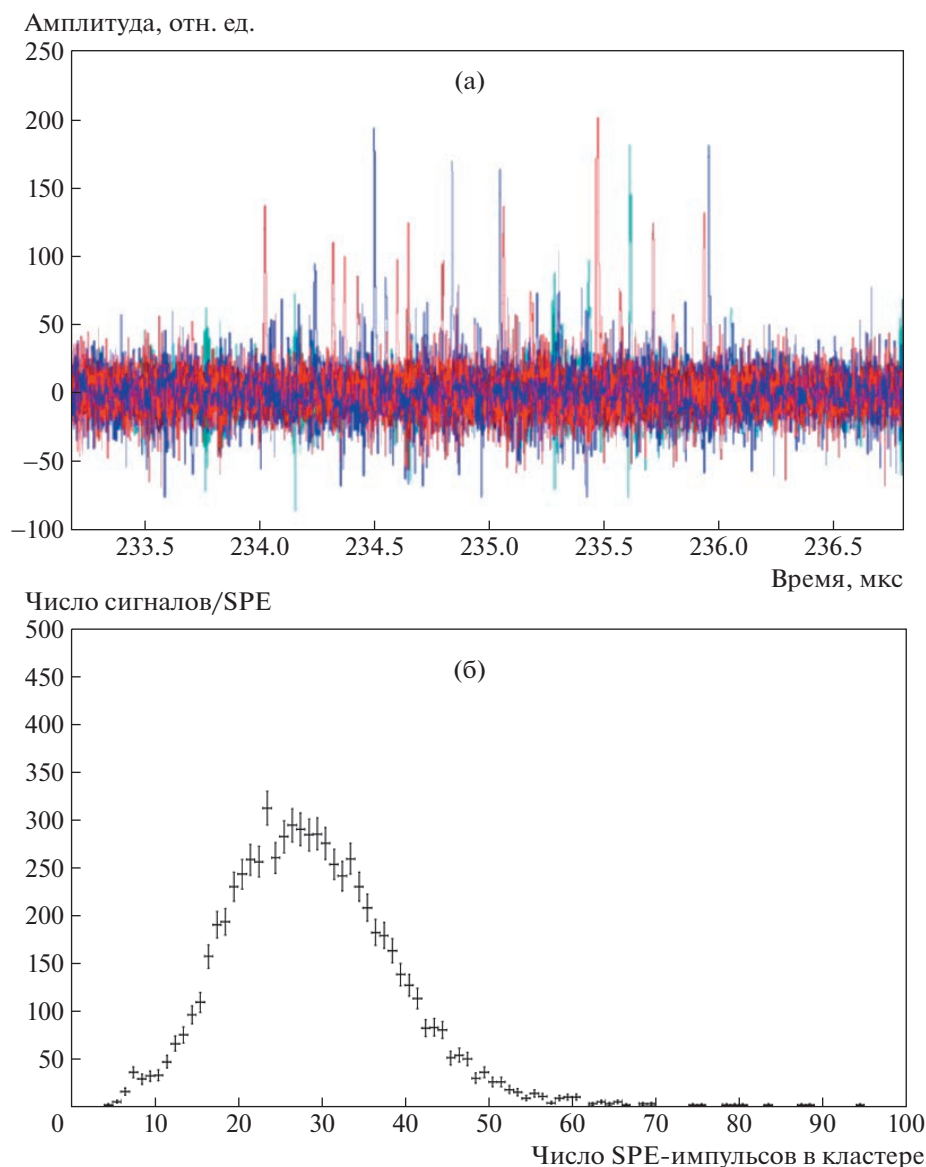


Рис. 3. Одноэлектронный SE-сигнал (разными цветами показаны SPE-сигналы от различных ФЭУ) в РЭД-100 [6] (а) и распределение числа SPE-сигналов на один SE-сигнал (б) [11].

тектора с частотой $f_{\mu} \sim 40$ Гц. Взаимодействие каждого из них с рабочим веществом детектора приводит к появлению нескольких миллионов квазисвободных электронов, дрейфующих в жидком ксеноне. Для уменьшения количества электронов, захватываемых потенциальным барьером под поверхностью раздела фаз, используется электронный затвор из двух параллельных сеток G1 и G2 (см. рис. 1), перекрывающий выход электронов из рабочего объема детектора к поверхности раздела фаз и электролюминесцентному промежутку в газовой фазе. Для включения электронного затвора используется триггер, настроенный на мощный сцинтилляционный сигнал, возникающий

при прохождении через рабочую среду детектора космического мюона.

Для проверки различных гипотез об источнике SE-шума были записаны осциллограммы для каждого ФЭУ длительностью ~ 600 мкс, как показано на рис. 4 и 5. Осциллограмма для каждого ФЭУ включает в себя: шумовую дорожку при полностью открытом затворе до появления сцинтилляционного сигнала от мюона S1; затем электролюминесцентный сигнал при частично ($\sim 10\%$) открытом затворе в интервалах времени от момента появления сцинтилляции S1 до момента времени 405 мкс на временной шкале рис. 4 и до момента времени 355 мкс на временной шкале рис. 5 с последующим полным закрытием затвора до момента времени

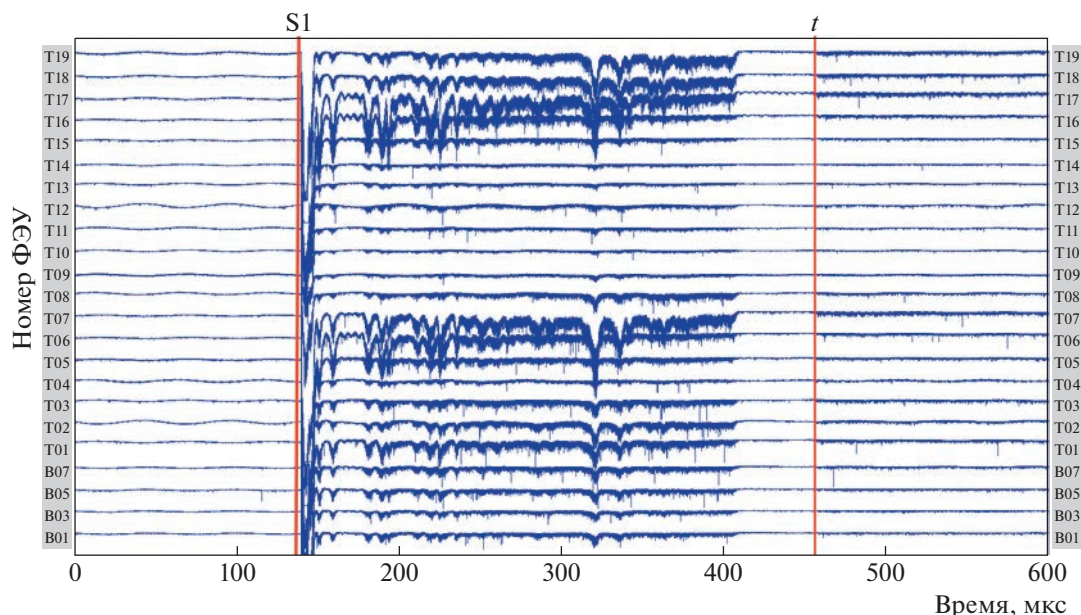


Рис. 4. Поканальные осциллограммы, зарегистрированные в РЭД-100 при “вертикальном” пролете космического мюона в момент времени S1: электронный затвор открыт во временном интервале {0; S1}, “приоткрыт” на 10% во временном интервале {S1; 405 мкс}, полностью закрыт в момент времени по временной оси 405 мкс и полностью открыт в момент времени по временной оси 455 мкс.

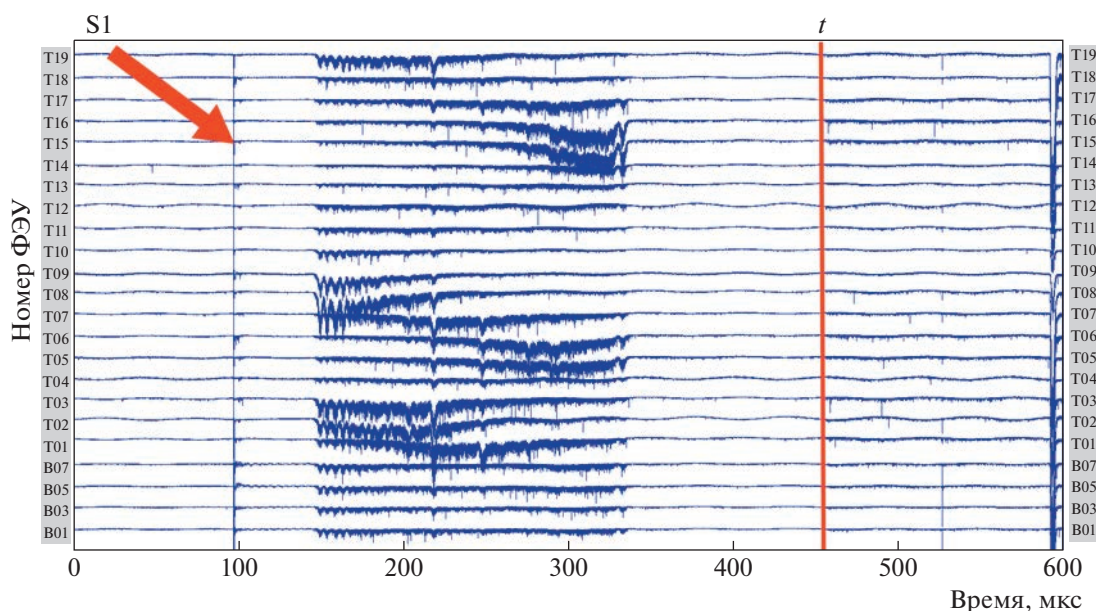


Рис. 5. Поканальные осциллограммы, зарегистрированные в РЭД-100 при “горизонтальном” пролете космического мюона в момент времени S1: электронный затвор открыт во временном интервале {0; S1}, “приоткрыт” на 10% во временном интервале {S1; 335 мкс}, электронный затвор полностью закрыт в момент времени по временной оси 335 мкс и полностью открыт в момент времени по временной оси 455 мкс.

t ; после чего заключительный отрезок времени после полного открытия затвора в момент времени $t = 450$ мкс на рис. 4 и $t = 455$ мкс на рис. 5.

Поканальные осциллограммы, записанные в указанных режимах, дают возможность опреде-

лить корреляцию положения первичного мюонного сигнала и центров последующей эмиссии одиночных электронов. Положение трека мюона определяется по форме поканальных осциллограмм от отдельных ФЭУ. Так, анализ временных

характеристик осциллограмм поканальных мюонных сигналов позволяет определить: проходил ли мюон через тефлоновый отражатель в дрейфовом объеме или пересекал сетчатый металлический катод. По времени начала электролюминесценции относительно момента появления сцинтилляции S1 можно определить, пересекал ли мюон поверхность жидкости. По задержке появления электролюминесцентного сигнала после триггерной сцинтилляционной вспышки относительно большой мощности можно оценить глубину, на которой возникли первичные электроны ионизации и ориентацию мюонного трека.

На рис. 4 инициированная мюоном электролюминесценция начинается одновременно со сцинтилляционной вспышкой в момент времени S1. Это означает, что мюон пересек свободную поверхность жидкого ксенона. При этом длительность электролюминесценции составляет 250 мкс, что равно максимальному времени дрейфа электронов через рабочий объем детектора. Это означает, что мюон пересек и катод детектора. Иными словами, в этом случае зарегистрирован “вертикальный” мюонный трек.

На рис. 5 появление электролюминесценции задержано относительно момента возникновения сцинтилляционной вспышки S1. Это означает, что мюон не пересекал поверхность раздела фаз. При этом длительность электролюминесценции (≈ 200 мкс) меньше полного времени дрейфа электронов через рабочий объем камеры, следовательно, мюон не пересекал и плоскость катода. Отсюда можно заключить, что рис. 5 демонстрирует сигнал РЭД-100 от “горизонтального” трека мюона.

Сравнение рис. 4 и 5 показывает, что координаты SE-сигналов после полного открытия затвора (вертикальная линия с отметкой t) коррелируют с положением трека мюона. Повышенная интенсивность SE-сигналов после полного открытия затвора наблюдается в тех же каналах, где перед этим наблюдалась интенсивная электролюминесценция, т.е. где была сосредоточена первичная ионизация от мюона и продуктов его взаимодействия с жидким ксеноном. При этом на осциллограммах рис. 4 не наблюдается увеличения интенсивности SE-сигналов в точках, соответствующих пересечению мюоном катода, а на рис. 5 отсутствует повышенная интенсивность SE-сигналов у краев рабочего объема, ограниченного тефлоновым отражателем, что свидетельствует о незначительной вероятности экстракции электронов из металлического сетчатого катода и тефлонового отражателя.

Средний ток SE-сигналов после момента времени t значительно выше интенсивности шума, наблюдаемого в тех же каналах до взаимодействия мюона с рабочим веществом детектора (до

момента S1), а по длительности существенно превышает максимальное время дрейфа квазисвободных электронов через рабочий объем детектора. Наблюдение “чистого” шума системы считывания сигналов по всем каналам в период времени $\{0; S1\}$ показывает, что характерное время генерации SE-шума в рабочем объеме детектора меньше величины $1/f_\mu \sim 25$ мс, где f_μ — средняя частота мюонных сигналов (см. разд. 4). Таким образом, мы приходим к заключению, что характерное время генерации SE-шума в рабочем объеме находится в миллисекундном диапазоне, а источники задержанной генерации одиночных электронов расположены в самом рабочем объеме детектора, заполненном жидким ксеноном. Аналогичное предположение о местонахождении основного источника SE-шума сделано и коллаборацией LZ [10].

5. РОЛЬ ЭЛЕКТРООТРИЦАТЕЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Интенсивность SE-шума, возникающего после облучения жидкого ксенона энергичными частицами, коррелирует с содержанием электроотрицательных примесей в жидком ксеноне. На рис. 6 приведены значения среднего количества фотоэлектронов, регистрируемых всеми ФЭУ за максимальное время дрейфа 250 мкс (SPE/WF), в зависимости от времени жизни электронов до захвата их электроотрицательными примесями. Видно, что есть обратная корреляция между частотой SE-сигналов и чистотой жидкого Xe. Эта корреляция особенно значительна в диапазоне $\{0; 3\}$ мс. На связь между чистотой газа и темпом счета SE-сигналов есть указания и в работе [13]. При работе с достаточно чистым ксеноном (время жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями > 1 мс) частота SE-шума в детекторе РЭД-100 с открытым электронным затвором составляет $f_0 \sim 200$ кГц.

Следует отметить, что доминирующей электроотрицательной примесью в жидком ксеноне является кислород. Мобильность отрицательных ионов кислорода, которые образуются молекулой кислорода, захватившей свободный электрон, в жидком ксеноне составляет $0.0005 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [14]. Такая чрезвычайно низкая подвижность связана с тем, что вокруг иона кислорода формируется массивный кластер из атомов ксенона, поляризованных полем электрона, находящегося на внешней оболочке иона кислорода. В дрейфовом поле 200 В/см в жидком ксеноне такой кластер дрейфует со скоростью порядка 1 мм/с . Это значит, что отрицательный ион кислорода, возникший вблизи катода РЭД-100 в результате захвата квазисвободного электрона, может дрейфовать через

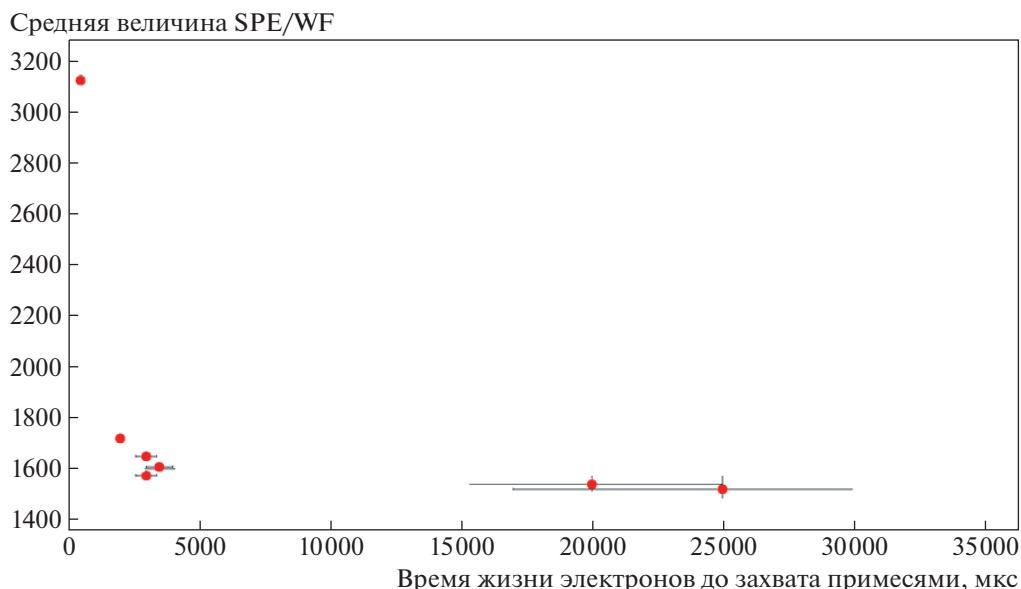


Рис. 6. Зависимость средней величины SPE/WF от времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями в жидком ксеноне.

объем детектора РЭД-100 в течение ~ 7 мин! Связь электрона с молекулой кислорода в таком комплексе должна быть ослаблена за счет поляризационного взаимодействия электрона, находящегося на внешней оболочке иона O_2^- , с входящими в комплекс атомами ксенона. Это может приводить к отрыву электронов от ионов O_2^- за время дрейфа и появлению в объеме жидкого ксенона квазисвободных электронов, формирующих вторую компоненту SE-шума.

При ионизации жидкого ксенона энергичным мюоном возможно также образование метастабильных отрицательных ионов [15]. Девозбуждение последних также может приводить к появлению квазисвободных электронов в жидком ксеноне.

В работе [16] из-за наклона детектора наблюдалось смещение плотности SE-сигналов вдоль поверхности раздела фаз в направлении от центра анода с течением времени (в масштабе ~ 100 мкс) после крупного энерговыделения. Аналогичный эффект наблюдался и в детекторе РЭД-100 (рис. 7). Этот эффект, вероятно, связан с непараллельностью электродов и поверхности раздела фаз, что приводит к появлению тангенциальной (направленной вдоль поверхности раздела фаз) компоненты электрического поля и сносу электронов, задержанных под поверхностью раздела фаз потенциальным барьером, к краю анода, где формируется повышенная напряженность электрического поля, вытягивающего электроны из конденсированной фазы. Такой эффект был наглядно продемонстри-

рован в работе [17] при искусственных вариациях наклона эмиссионного детектора.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании жидкого ксенона в качестве рабочего вещества эмиссионного детектора, работающего в наземных условиях, наблюдается два доминирующих источника SE-шума:

а) подповерхностные электроны, захваченные потенциальным барьером на границе раздела фаз (относительно слабоинтенсивный источник с характерными временами порядка времени жизни электронов до захвата электроотрицательными примесями);

б) сам рабочий объем детектора, заполненный жидким ксеноном, после облучения его мощным ионизирующим излучением космического происхождения (относительно интенсивный источник с характерными временами в миллисекундном диапазоне).

Вторая компонента SE-шума может быть связана с освобождением электронов отрицательными ионами O_2^- , дрейфующими в центре массивных комплексов поляризованных атомов ксенона, что ослабляет энергию связи электрона с молекулой кислорода.

Рабочий объем эмиссионного детектора РЭД-100, работающего в условиях наземной лаборатории и использующего жидкий ксенон в качестве рабочего вещества, является источником одноэлектронных шумовых сигналов с характерной частотой ~ 200 кГц при полностью открытом

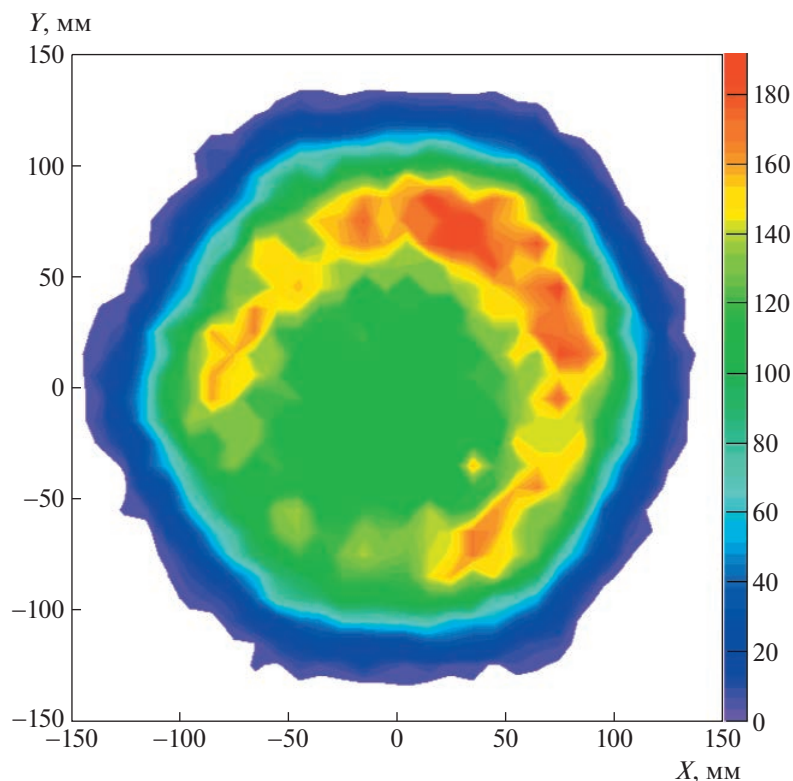


Рис. 7. Распределение плотности SE-сигналов по полю зрения детектора со смещением по линии ФЭУ с номерами T18–T12 в сторону ФЭУ № T12 (номера ФЭУ указаны на рис. 2).

электронном затворе. Включение затвора после прохождения энергичных космических мюонов понижает среднюю частоту SE-сигналов, однако при этом существенно увеличивается мертвое время детектора, так как для эффективной блокировки SE-сигналов необходимо включать затвор на несколько миллисекунд.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Российскому научному фонду (контракт № 22-12-00082 от 13 мая 2022 года) за поддержку анализа полученных с детектором РЭД-100 экспериментальных данных.

Авторы благодарны проф. А.Г. Храпаку за обсуждение возможных механизмов образования одноэлектронного шума в жидком ксеноне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгошеин Б.А., Лебеденко В.Н., Родионов Б.У. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 4. С. 351.
2. Болоздыня А.И., Егоров О.К., Коршунов А.А., Мирошниченко В.П., Родионов Б.У., Соколов Л.И., Сосновцев В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 25. № 9. С. 401.
3. Bolozdynya A.I., Egorov O.K., Sokolov L.I., Miroshnichenko V.P., Rodionov B.U. Solid State Nuclear Track Detectors / Ed. by H. Francois, Oxford, NY.: Pergamon Press, 1980. P. 29–32.
4. Болоздыня А.И., Егоров О.К., Мирошниченко В.П., Родионов Б.У., Шувалова Е.Н. // Элементарные частицы и космические лучи. Вып. 5. М.: Атомиздат, 1980. С. 65–72.
5. APPEC Committee. Direct Detection of Dark Matter – APPEC Committee Report. arXiv:2104.07634v1 [hep-ex] 15 Apr 2021. 106 pp.
6. The RED-100 collaboration // JINST. 2020. V. 15. P02020. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/P02020>
7. Болоздыня А.И., Егоров В.В., Калашников С.Д., Кривошеин С.Д., Мирошниченко В.П., Родионов Б.У. // ПТЭ. 1985. № 4. С. 43.
8. Bolozdynya A., Egorov V., Koutchenkov A., Safronov G., Smirnov G., Medved S., Morgunov V. // Nucl. Instrum. and Methods A. 1997. V. 385. P. 225.
9. Bolozdynya A.I. Emission Detectors. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010. <https://doi.org/10.1142/6984>
10. Akerib D., Alsum S., Boulton E.M., Boxer B., Brás P., Burdin S., Byram D., Carmona-Benitez M.C., Chan C., Cutter J.E., de Viveiros L., Druszkiewicz E., Fan A., Fiorucci S., Gaitskell R.J. et al. // Phys. Rev. D. 2020. V. 102. P 092004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.092004>
11. Акимов Д.Ю., Болоздыня А.И., Коновалов А.М., Кумпан А.В., Меликян Ю.А., Рудик Д.Г., Сосновцев В.В.,

- Хромов А.В., Шакиров А.В.* Патент RU 184222 U1. МПК G01T 1/00 (2006.01) // Оpubл. 18.10.2018. Бюл. № 29.
12. *Нищета Д.А.* Сигналы от одиночных электронов ионизации в детекторе РЭД-100. ВКР бакалавра. НИЯУ МИФИ, 2019.
13. *Sorenson P., Kamdin K.* // JINST. 2018. V. 13. P02032. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/02/P02032>
14. *Khrapak A.G., Volykhin K.F.* // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 2. С. 584.
15. *Christophorou L.G.* // Advances in Electronics and Electron Physics. 1978. V. 46. P. 55. [https://doi.org/10.106/s0065-2539\(08\)60411-4](https://doi.org/10.106/s0065-2539(08)60411-4)
16. *Akimov D.Yu., Belov V.A., Bolozdynya A.I., Burenkov A.A., Efremenko Yu.V., Etenko A.V., Kaplin V.A., Karelin A.K., Khromov A.V., Kirsanov M.A., Klimanov S.G., Kobyakin A.S., Kononov A.M., Kovalenko A.G., Kuchenkov A.V. et al.* // JINST. 2016. V. 11. C03007. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/03/C03007>
17. *Анисимов С.Н., Болоздыня А.И., Стеханов В.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40. № 3. С. 829.