

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.074.3

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ СЧЕТЧИКОВ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНЫХ И
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ

© 2026 г. В. В. Бреховских^{a,*}, Н. Е. Воронков^a, А. М. Горин^a,
В. А. Дятченко^a, С. В. Евдокимов^a, А. А. Зайцев^b, В. И. Изучеев^a,
А. К. Коноплянников^a, М. В. Медынский^a, В. И. Рыкалин^a,
С. А. Садовский^a, А. А. Шангараев^a

^a *Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова*

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

^b *Объединенный институт ядерных исследований*

141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

** e-mail: brekhovs@ihep.ru*

Поступила в редакцию 17.10.2025 г.

После доработки 07.11.2025 г.

Принята к публикации 29.11.2025 г.

Рассматриваются характеристики пластмассовых сцинтилляционных счетчиков с различными системами вывода и регистрации сцинтилляционного излучения, предназначенных для детектирования гамма-квантов в широкой области энергий. Такие счетчики, имеющие высокий световыход, находят широкое применение в ядерной физике, физике высоких энергий, в системах радиационного контроля. Однако детектирование низкоэнергетического гамма-излучения при низком световыходе от гамма-квантов требует, соответственно, и достаточно низких порогов регистрации, что приводит к возрастанию шумового счета. В работе проведено сравнение эффективности регистрации гамма-квантов счетчиками относительно больших размеров, использующих в качестве фотоприемника вакуумные и кремниевые фотоумножители, в последнем случае при выводе света из сцинтиллятора с помощью спектросмещающих волокон. Счетчики с такой системой детектирования сцинтилляций по целому ряду параметров превосходят счетчики с вакуумными ФЭУ. Вместе с тем в работе показано, что в области регистрации низкоэнергетических гамма-квантов, важной для систем радиационного контроля, счетчики на основе кремниевых ФЭУ и спектросмещающих волокон, например при энергии 60 кэВ, на порядок величины уступают по эффективности регистрации счетчикам с вакуумными ФЭУ. Показано, что это связано со значительным фоном от темнового шума кремниевых ФЭУ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной регистрации гамма-квантов в широком диапазоне энергий используются, главным образом, толстые пластмассовые сцинтилляционные счетчики относительно больших размеров с площадью чувствительной поверхностью около 100000 мм^2 . Сравнительно небольшой световыход таких счетчиков, например в области регистрации низкоэнергетических гамма-квантов, важной для систем радиационного контроля, накладывает жесткие требования на их конструкцию и выбор материалов – используются сцинтилляторы с максимальным световыходом, обернутые эффективно отражающим сцинтилляционное излучение материалом, оптимизируется светосбор, выбираются наиболее чувствительные фотоприемники.

Можно привести следующие примеры подобных счетчиков.

1. Так называемые шатровые счетчики [1] с размерами сцинтиллятора $500 \times 500 \times 50 \text{ мм}^3$ и вакуумными фотоумножителями ФЭУ-49 или ФЭУ-125. Такие счетчики предназначались для регистрации космических мюонов, но могут использоваться и для эффективной регистрации гамма-квантов, хотя их габариты не являются оптимальными. Подобные счетчики в количестве около 1500 шт используются, например, на Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук и еще в большем количестве на установках, связанных с регистрацией космических лучей.

2. Счетчики [2] с размерами сцинтиллятора $850 \times 130 \times 40 \text{ мм}^3$ (здесь и всюду далее размеры сцинтилляторов указаны в формате длина×ширина×толщина) и вакуумные ФЭУ фирмы НАМАМАТСУ с диаметром фотокатода 25 мм, показавшие по нашим измерениям высокую эффективность регистрации гамма-квантов.

3. Счетчики с размерами сцинтиллятора от $250 \times 250 \times 50 \text{ мм}^3$ до $500 \times 500 \times 50 \text{ мм}^3$ с выводом света из сцинтилляторов с помощью спектросмещающих волокон (WLS) и кремниевых ФЭУ (SiPM) [3] нашли применение для регистрации космического излучения. Более 300 таких счетчиков используются, например, в охранной системе эксперимента Нейтрино-4 [4]. Как будет показано ниже, упомянутые счетчики являются далеко не оптимальными для регистрации гамма-квантов.

4. Сцинтилляционные счетчики, используемые в пешеходных и транспортных радиационных мониторах, мониторах для радиационного контроля багажа, одежды и радиоактивных отходов. Размеры сцинтилляторов счетчиков близки к указанным в п. 3, а в качестве фотодетекторов используются, как правило, вакуумные ФЭУ.

В настоящей работе рассматриваются сравнительные характеристики пластмассовых сцинтилляционных счетчиков с различными системами вывода и регистрации

сцинтилляционного излучения с точки зрения возможности их применения для регистрации гамма-квантов низких энергий. Эти счетчики имеют сравнимые световыходы и находят широкое применение в ядерной физике, физике высоких энергий, в системах радиационного контроля. Однако детектирование низкоэнергетического гамма-излучения при низком световыходе от частиц реализуется при достаточно низких порогах регистрации, что естественно приводит к возрастанию влияния шумового счета. В работе проведено сравнение эффективности регистрации гамма-квантов счетчиками относительно больших размеров, использующих в качестве фотоприемника вакуумные фотоумножители с непосредственным контактом со сцинтиллятором и систем кремниевые фотоумножители – спектросмещающие волокна (WLS), выводящие свет из сцинтиллятора. Счетчики с такой системой регистрации сцинтилляций по целому ряду параметров превосходят счетчики с вакуумными ФЭУ. К сожалению, в области регистрации низкоэнергетических гамма-квантов, например при энергии 60 кэВ, счетчики с использованием отдельных SiPM и спектросмещающих волокон более, чем на порядок величины, уступают по эффективности регистрации счетчикам с отдельными вакуумными ФЭУ при сравнимом световыходе, что в основном и рассматривается в настоящей работе. Обсуждаются также и возможные варианты увеличения эффективности регистрации гамма-квантов счетчиками на основе SiPM и WLS.

2. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ НА ОСНОВЕ ВАКУУМНЫХ ФЭУ

Хорошим примером удачной реализации счетчика для регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ и выше является детектор БДС-ГЗМ (фирма “Аспект”) [2] с размером чувствительной области $850 \times 130 \times 40$ мм³ и площадью 110500 мм². В счетчике используется прозрачный полистирольный сцинтиллятор. Детектирование света осуществляется с помощью пристыкованного к одной из торцевых граней ФЭУ (Hamamatsu) с диаметром фотокатода 25 мм и хорошо выделяющимся одноэлектронным пиком. Питание ФЭУ имеет положительную полярность для уменьшения шумов фотокатода. Одноэлектронный амплитудный спектр этого ФЭУ, полученный нами с помощью светодиода, приведен на рис.1. Измеренный световыход счетчика по космическим мюонам с триггерным счетчиком, размещенным в середине пластины, составил 350 фотоэлектронов (фэ).

Рис. 1. Одноэлектронный спектр ФЭУ, полученный при использовании в качестве источника света светодиода.

Зависимость скорости счета импульсов, регистрируемых от естественного радиоактивного фона, и гамма-квантов с энергией 60 кэВ счетчиком БДС-ГЗМ для различных величин порога регистрации, приведена в табл. 1. Видно, что максимальная

скорость счета импульсов от гамма-квантов реализуется при минимальном пороге в 0.5 фэ (дальнейшие измерения проводились при этом пороге). При этом скорость счета фоновых импульсов составляет около $2 \cdot 10^3$ 1/с.

Таблица 1. Зависимость количества зарегистрированных импульсов от величины порога регистрации

Измерения за 10 с	Порог, фэ				
	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
Фон N	$(208.0 \pm 1.4) \cdot 10^2$	$(164.0 \pm 1.3) \cdot 10^2$	$(85.5 \pm 1.0) \cdot 10^2$	$(64.0 \pm 0.8) \cdot 10^2$	$(30.0 \pm 0.5) \cdot 10^2$
^{241}Am	$(850 \pm 3) \cdot 10^2$	$(588.0 \pm 2.4) \cdot 10^2$	$(183.5 \pm 1.3) \cdot 10^2$	$(88.5 \pm 0.9) \cdot 10^2$	$(31.5 \pm 0.6) \cdot 10^2$
$\Delta = ^{241}\text{Am} - \text{N}$	$(642 \pm 3) \cdot 10^2$	$(424.0 \pm 2.7) \cdot 10^2$	$(98.0 \pm 1.6) \cdot 10^2$	$(24.5 \pm 1.2) \cdot 10^2$	150 ± 78
Δ/N	$(309 \pm 2) \cdot 10^{-2}$	$(259 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(115 \pm 3) \cdot 10^{-2}$	$(38 \pm 2) \cdot 10^{-2}$	$(5 \pm 3) \cdot 10^{-2}$

Примечание. Радиоактивный источник ^{241}Am (активность 12500 1/с в 2π) размещен в середине пластины. Напряжение питания ФЭУ составляет 1200 В.

Амплитудные спектры фона и сигналов радиоактивного источника ^{241}Am приведены на рис.2. Оба спектра набирались за равное время (1 мин.), а затем из спектра с ^{241}Am вычитался фоновый спектр с коррекцией на мертвое время системы сбора данных. Максимумы всех спектров хорошо совпадают с одноэлектронным пиком. Таким образом, в данном детекторе гамма-квант с энергией 60 кэВ в фотоприемнике генерирует, в основном, лишь отдельные фотоэлектроны.

Рис. 2. Амплитудные спектры БДС-ГЗМ

Результаты изменения скорости счета радиоактивного источника ^{241}Am (за вычетом среднего фона 2040 1/с) вдоль пластины сцинтиллятора приведены на рис.3. Отношение скорости счета импульсов в ближней и самой дальней точках составляет 1.63.

Рис. 3. Скорость счета гамма-квантов от радиоактивного источника ^{241}Am в зависимости от расстояния до фотокатода ФЭУ вдоль пластины сцинтиллятора.

Интересно оценить эффективность регистрации счетчика в середине сцинтиллятора (40 см), где в оптимальном по Δ/N из приведенных в табл. 1 вариантов скорость счета импульсов Δ составляет 6420 имп/с ± 30 . Радиоактивный источник ^{241}Am , размещенный на поверхности детектора, излучает в полный телесный угол 25000 частиц/с, а в полусферу – 12500 частиц/с. Тогда эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ составит величину 0.514 ± 0.002 , при этом в соответствии со справочными данными [5] длина поглощения гамма-квантов составляет 55 ± 1 мм. Соответствующая этой величине эффективность регистрации одиночных гамма-квантов при толщине сцинтиллятора 40 мм равна 0.517 ± 0.006 , что

согласуется со значением приведенной выше экспериментально измеренной эффективности регистрации, равной 0.514 ± 0.002 .

3. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ С ВЫВОДОМ СВЕТА СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИМИ ВОЛОКНАМИ НА ОДИН SiPM

3.1. Сцинтилляционный счетчик с размерами $350 \times 290 \times 50$ мм³ и площадью 101500 мм²

Большой интерес представляет использование современных полупроводниковых ФЭУ в упомянутых детекторах для регистрации гамма-квантов в широком диапазоне энергий. При выводе света из сцинтиллятора на отдельный SiPM с помощью спектросмещающих (WLS) волокон легко достигается количество фотоэлектронов, сравнимое со случаем счетчика БДС-ГЗМ, описанного в предыдущем разделе. При этом стоимость изготовленного из гранул сцинтиллятора, который может быть использован в счетчике на основе WLS-волокон и SiPM, составляет величину, в несколько раз меньшую, чем в случае БДС-ГЗМ. Такое же соотношение стоимостей в пользу SiPM имеет место и при сравнении с вакуумными ФЭУ, которые обычно используются в подобных детекторах. В случае сцинтилляторов это связано с тем, что в БДС-ГЗМ необходимо использовать высокопрозрачный сцинтиллятор, изготовленный путем механической обработки крупногабаритной полимеризованной заготовки. В то же время в случае счетчика на основе WLS-волокон и SiPM сцинтиллятор может быть изготовлен практически без механической обработки способом плавления в зеркальных формах опудренных сцинтилляционными добавками промышленных полистирольных гранул, либо литьем под давлением или экструдированием. Конструкции, характеристики и применение счетчиков со сцинтилляторами, изготовленными плавлением гранул в зеркальных формах описаны в ряде работ [3, 4, 6]. Характерным примером применения таких счетчиков является их использование в охранных системах физических установок для запрета регистрации космического излучения [4].

На рис. 4 показаны используемая нами в настоящее время типовая конфигурация WLS-волокон, вклеенных в канавки на фронтальной поверхности сцинтиллятора счетчика с размерами $500 \times 500 \times 50$ мм³, и амплитудный спектр счетчика, полученный при регистрации космических мюонов [7].

Рис. 4. Слева: используемая конфигурация WLS-волокон в счетчике с размерами $500 \times 500 \times 50$ мм³; справа: его амплитудный спектр

Выбранная конфигурация WLS-волокон типа Y-11 [8] и незначительные размеры, например SiPM MicroFC-30035-SMT [9], составляющие $3 \times 3 \times 0.4$ мм³, позволяют сделать практически одинаковыми габаритные размеры счетчика и размеры его сцинтиллятора. Это

обстоятельство, несомненно, является преимуществом, так как позволяет создавать фактически беззачерные детектирующие плоскости, нечувствительные к магнитным полям.

Однако у подобных счетчиков с SiPM есть и существенный недостаток – крайне высокий уровень шумовых импульсов. На рис. 5 приведена зависимость скорости счета шумовых импульсов светоизолированного SiPM от порога регистрации, и в табл. 2 – измеренные значения скорости счета.

Рис. 5. Скорость счета темновых импульсов светоизолированного SiPM при напряжении смещения 30 В в зависимости от порога регистрации.

Таблица 2. Скорость счета темновых импульсов светоизолированного SiPM при напряжении смещения 30 В в зависимости от величины порога регистрации

Порог, фэ	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Скорость счета, $10^3/с$	1050	771	284	192	94	67.3	35.7	25.2	14.6	10.8	6	4.4	2.8	2.2

Уже из этих данных по темновым шумам SiPM следует, что при сравнимых размерах и световых выходах счетчика с вакуумным ФЭУ и счетчика на основе WLS и SiPM последний не может конкурировать в части эффективности регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ используемого радиоактивного источника ^{241}Am . Действительно, при этих сигналах, примерно соответствующих 1 фэ, скорость счета темновых шумов будет почти на два порядка величины превышать интенсивность падающего на счетчик потока гамма-квантов (см. табл. 3) даже без учета эффективности их регистрации, естественного радиоактивного фона и космического излучения.

Таблица 3. Количество зарегистрированных импульсов для детектора с размерами сцинтиллятора $350 \times 290 \times 50$ мм³ и SiPM в качестве фотодетектора в зависимости от величины порога регистрации

Измерение за 10 с	Порог, фэ					
	0.76	1.31	1.47	1.95	2.42	4.96
Фон N	$(5525 \pm 2) \cdot 10^3$	$(1132.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(1082.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(817.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(2390 \pm 5) \cdot 10^2$	$(108.0 \pm 1.0) \cdot 10^2$
^{241}Am	$(5554 \pm 2) \cdot 10^3$	$(1140.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(1091.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(822.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(2380 \pm 5) \cdot 10^2$	$(110.3 \pm 1.1) \cdot 10^2$
$\Delta = ^{241}\text{Am} - \text{N}$	$(29 \pm 3) \cdot 10^3$	$(8.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(9.0 \pm 1.4) \cdot 10^3$	$(5.0 \pm 1.4) \cdot 10^3$	$(-10 \pm 7) \cdot 10^2$	$(2.30 \pm 1.5) \cdot 10^2$
Δ/N	$(52 \pm 5) \cdot 10^{-4}$	$(71 \pm 9) \cdot 10^{-4}$	$(8.3 \pm 1.3) \cdot 10^{-3}$	$(6.1 \pm 1.7) \cdot 10^{-3}$	$(-4.2 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(2.1 \pm 1.4) \cdot 10^{-2}$

Примечание. Радиоактивный источник ^{241}Am находится в центре пластины. Напряжение смещения SiPM составляет 30 В. Скорость счета импульсов берется как среднее трех измерений за 10 с.

Следует отметить, что трудности в режекции шумовых сигналов связаны не только с их огромной скоростью счета, но и с тем фактом, что шумы состоят из одноэлектронных, двухэлектронных и других фракций. Это связано с наличием кросс-токов между светочувствительными ячейками SiPM и объясняет протяженный характер зависимости скорости счета темновых импульсов от порога регистрации (рис.5).

Для сравнительных измерений эффективности регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ счетчиком БДС-ГЗМ и счетчиком на основе WLS и SiPM был использован детектор с одним SiPM и сцинтиллятором с размерами $350 \times 290 \times 50$ мм³, имеющим световыход от космических мюонов 150 фэ. Зависимости скорости счета фона и гамма-квантов с энергией 60 кэВ указанным счетчиком от порога регистрации приведены в табл. 3.

Как и следовало ожидать, эффективность регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ счетчиком БДС-ГЗМ на несколько порядков величины выше, чем у описанного выше счетчика с одним SiPM и сцинтиллятором с размерами $350 \times 290 \times 50$ мм³.

3.2. Сцинтилляционный счетчик с размерами $500 \times 140 \times 46$ мм³ и площадью 70000 мм²

Нами также был изготовлен счетчик, который позволяет собирать свет как с помощью одного, так и с помощью двух SiPM. Противоположные торцы девяти WLS волокон собраны в квадрат со стороной 3 мм и могут пристыковываться либо к соответствующим SiPM, либо к одному SiPM и зеркальной поверхности на противоположном конце сборки волокон (в данном случае на одном конце сборки волокон стоит зеркальный отражатель из майлара с коэффициентом отражения около 80%, а на другом – SiPM). Полистирольный сцинтиллятор имеет размеры $500 \times 140 \times 46$ мм³, на его поверхности сделаны канавки, в которые вклеены 9 петель WLS-волокон типа Y11(200M). Счетчик обернут светоотражающим материалом типа Тувек и черно-красной фотобумагой для светоизоляции. Амплитудный спектр одного SiPM при использовании зеркальной поверхности на противоположных торцах волокон приведен на рис. 6. Счетчик имеет достаточно высокий световыход, составляющий при напряжении смещения 30 В более 300 фотоэлектронов, что вдвое больше, чем у аналогичного счетчика, описанного выше.

Рис. 6. Амплитудный спектр космических мюонов одного из SiPM с внешним триггером и зеркалом из майлара на дальнем конце волокон

Зависимости скорости счета фона и гамма-квантов с энергией 60 кэВ счетчика от величины порога регистрации приведены в табл. 4.

Таблица 4. Количество зарегистрированных импульсов для детектора размером $500 \times 140 \times 46$ мм³ и одним SiPM с зеркальным отражателем на противоположном торце волокна в зависимости от величины порога регистрации

Измерение за 10 с	Порог, фэ					
	0.5	1.33	2.17	3.0	3.83	4.67
Фон N	$(6970 \pm 3) \cdot 10^3$	$(1265.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(333.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(1850 \pm 4) \cdot 10^2$	$(485 \pm 2) \cdot 10^2$	$(140.0 \pm 1.0) \cdot 10^2$
²⁴¹ Am	$(7020 \pm 3) \cdot 10^3$	$(1307.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(338.0 \pm 1.0) \cdot 10^3$	$(1970 \pm 4) \cdot 10^2$	$(500 \pm 2) \cdot 10^2$	$(145.0 \pm 1.0) \cdot 10^2$
$\Delta = ^{241}\text{Am} - \text{N}$	$(500 \pm 42) \cdot 10^2$	$(420 \pm 14) \cdot 10^2$	$(50 \pm 14) \cdot 10^2$	$(120 \pm 6) \cdot 10^2$	$(15.0 \pm 2.8) \cdot 10^2$	$(5.0 \pm 1.4) \cdot 10^2$
Δ/N	$(72 \pm 6) \cdot 10^{-4}$	$(332 \pm 11) \cdot 10^{-4}$	$(15 \pm 4) \cdot 10^{-3}$	$(65 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$(31 \pm 6) \cdot 10^{-3}$	$(36.0 \pm 1.0) \cdot 10^{-3}$

Примечание. Радиоактивный источник ²⁴¹Am находится в центре пластины. Напряжение смещения SiPM составляет 30 В. Скорость счета импульсов берется как среднее трех измерений за 10 с.

Необходимо отметить, что у этого детектора по сравнению с предыдущим эффективность регистрации гамма-квантов возросла в 3 раза и составляет несколько более 5%.

3.3. Сцинтилляционный счетчик с двумя SiPM с размерами $500 \times 140 \times 46$ мм³ и площадью 70000 мм²

Как уже отмечалось в разделах, описывающих счетчики с одним SiPM, собственный шум SiPM (около $10^5 / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$) при низком пороге дискриминации (порядка 1 фэ) ограничивает их применение в детекторах, регистрирующих отдельные фотоэлектроны. Для эффективного подавления собственных шумов фотоприемников естественно использовать для регистрации светового сигнала сцинтиллятора два SiPM со схемой совпадений сигналов от них. Такой подход был использован в детекторах бета-загрязнений на основе тонких сцинтилляционных счетчиков [10, 11]. Значения скорости счета темновых импульсов и эффективности работы схемы совпадений в зависимости от порога усилителя дискриминатора проиллюстрированы в табл. 5 для напряжения смещения на SiPM 30 В.

Таблица 5. Скорость счета импульсов от SiPM в зависимости от величины порога регистрации импульсов

Порог, фэ	Скорость счета темн. имп., 1/с (измерения)	Скорость счета при совпадениях 25 нс, 1/с (расчет)
0.5	1 050 000	55125
1	771 000	29723
15	284 000	4033
2	192 000	1843
25	94 000	442

3	67 300	227
35	35 700	63
4	25 200	32
45	14 600	10
5	10 800	6

Измерения некоррелированных шумов светоизолированных SiPM в сравнении с шумами этого детектора (рис.7) показывают, что скорость счета совпадений собственных шумов SiPM существенно меньше суммарных фоновых шумов и быстро уменьшаются при увеличении порога регистрации. Так, при величине порога 25 мВ (1.5 фэ) отношение (фон + шум) / шум составляет величину 4.7, а при величине порога 55 мВ (4.5 фэ) – примерно 10. Однако не следует забывать, что использование в детекторе при регистрации светового сигнала двух SiPM вместо одного вдвое уменьшает чувствительность самого детектора на пороге регистрации.

Рис. 7. Скорость счета совпадений сигналов двух SiPM

Из зависимостей на рис. 7 также следует, что шумы детектора при низких величинах порога регистрации в значительной мере определяются радиоактивным фоном окружающей среды, а при высоких (более 90 мВ) – космическим излучением.

Детектор, описанный в разд. 3.3, в варианте присоединения второго SiPM к свободным торцам WLS-волокон и подключении обоих кремниевых ФЭУ к схеме совпадений с разрешением 25 нс использовался и для регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ. При этом был выбран порог регистрации, равный 1.5 фэ (при напряжении смещения на SiPM 30 В), из соображений приемлемого фонового счета. В табл. 6 приведены скорости счета фоновых импульсов и скорости счета от ^{241}Am для детектора при различных напряжениях смещения на SiPM, т.е. при разных величинах эффективного порога.

Таблица 6. Количество зарегистрированных импульсов детектора с размерами $500 \times 140 \times 46$ мм³ в зависимости от напряжения на SiPM при разрешении схемы совпадении 25 нс

Измерение за 10 с	Напряжение смещения SiPM, В			
	29.5	30.0	30.5	31.0
Фон N	$(272.5 \pm 1.7) \cdot 10^2$	$(560 \pm 2) \cdot 10^2$	$(810 \pm 3) \cdot 10^2$	$(1420 \pm 4) \cdot 10^2$
^{241}Am	$(274.0 \pm 1.7) \cdot 10^2$	$(750 \pm 3) \cdot 10^2$	$(1040 \pm 3) \cdot 10^2$	$(1850 \pm 4) \cdot 10^2$
$\Delta = ^{241}\text{Am} - \text{N}$	(150 ± 234)	$(190 \pm 4) \cdot 10^2$	$(230 \pm 4) \cdot 10^2$	$(430 \pm 6) \cdot 10^2$
Δ/N	$(6 \pm 12) \cdot 10^{-3}$	$(339 \pm 6) \cdot 10^{-3}$	$(284 \pm 5) \cdot 10^{-3}$	$(303 \pm 4) \cdot 10^{-3}$

Примечание. Радиоактивный источник ^{241}Am расположен в центре пластины. Скорость счета импульсов берется как среднее трех измерений за 10 с. Величина порога регистрации составляет 5 мВ (1.5 фэ) при напряжении смещения 30 В.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены характеристики ряда пластмассовых сцинтилляционных счетчиков с различными системами вывода и регистрации сцинтилляционного излучения, предназначенных для регистрации гамма-квантов в широкой области энергий. Показано, что среди рассмотренных наиболее высокую эффективность в критически важной области детектирования гамма-квантов низких энергий обеспечивает счетчик БДС-ГЗМ (фирма “Аспект”) [2], состоящий из прозрачной (полимеризованной) полистирольной пластины и пристыкованного к ней вакуумного ФЭУ, т. е. имеющий обычную классическую конструкцию. В то же время счетчики с альтернативным способом собирания сцинтилляционного излучения WLS-волокнами на кремниевые ФЭУ, имеют целый ряд преимуществ по магнитостойкости, виброустойчивости, низковольтности питания, стоимости, уникальной компактности SiPM, что позволяет создавать на их основе практически безззорные стенки из детекторов. Все это имеет место при сравнимом световыходе, но в 50 раз меньшей эффективности регистрации, например для гамма-квантов с энергией 60 кэВ. В работе показана связь этого существенного недостатка указанных счетчиков с природой шумов SiPM.

Использование в счетчике второго SiPM и их подключении к схеме совпадений существенно меняет ситуацию, и различие в эффективностях регистрации гамма-квантов с энергией 60 кэВ составляет уже 10 раз, что видно из сравнения данных табл. 1 и 6. Правда, использование в счетчике двух вакуумных ФЭУ также увеличит эффективность регистрации гамма-квантов.

Безусловно, увеличение световыхода сцинтилляторов и их легирование тяжелыми металлоорганическими соединениями могут увеличить эффективность регистрации гамма-квантов низких энергий, но в равной степени это будет относиться и к счетчикам классической конструкции, так как разрыв в эффективности регистрации гамма-квантов сохранится. Для улучшения характеристик счетчиков на основе SiPM, кроме очевидной, но не простой в реализации возможности их охлаждения, остается технологический путь подавления термозумов и кросс-токов в SiPM. Анализ формы сигналов SiPM, по-видимому, также можно использовать для подавления шумов. На рис. 8, 9 приведено по несколько десятков осциллограмм шумовых импульсов и импульсов светодиода с длительностью импульса 20 нс при среднем количестве фотоэлектронов равным 2. Осциллограммы получены при регистрации сигналов SiPM MicroFC-30035-SMT с использованием “быстрого вывода” [12] и напряжении смещения 30 В. Из сравнения осциллограмм видно, что формы

шумовых и светодиодных сигналов заметно различаются по форме, хотя и имеют общую компоненту одноэлектронных импульсов в соответствии с распределением Пуассона.

Рис. 8. Осциллограммы шумовых импульсов.

Рис. 9. Осциллограммы импульсов светодиода с длительностью 20 нс и средним числом фотоэлектронов равным 2.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.М. Зайцеву за поддержку работы, В.Ф. Образцову за интерес к работе и полезные обсуждения, и всему коллективу сектора сцинтилляционных и фотоэлектронных приборов НИЦ “Курчатовский институт”– ИФВЭ за неоценимую помощь в изготовлении сцинтилляционных счетчиков.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект No 22-12-00095-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00095-П/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романенко В.С., Вайман И.А., Васильев Н.А., и др. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2025. Т. 56. № 2. С. 174.
2. <https://www.aspect-dubna.ru/product-category/tekhnologicheskie-spektrometry/ustrojstva-i-bloki-detektirovaniya/>
3. Gorin A.M., Medynsky M.V., Morozova V.V., Rykalin V.I., Volkov V.V. // Proc. International Conference on New Photo-detectors (PhotoDet2015). Troitsk. PoS. 2015. V. 252. <https://doi.org/10.22323/1.252.0078>
4. Серебров А.П., Ивочкин В.Г., Самойлов Р.М. и др. // ЖТФ. 2023. Т. 93. № 1. С. 175. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.01.54079.241-22>
5. S. Navas et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D 110, 030001 (2024) P. 584
6. Rykalin V., Brekhovskikh V., Chernichenko S., Gorin A., Semenov V. // Journal of Physical Science and Application. 2015. P. 6-13.
7. V. Brekhovskikh, A. Gorin, V. Dyatchenko, M. Medynsky, and V. Rykalin. // Physics of Atomic Nuclei. 2019. V. 82. № 6. P. 649.
8. <http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>
9. О’Нил К., Джексон С. // Фотоника. 2014. № 6. С. 70. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22564446>
https://www.photonics.su/files/article_pdf/4/article_4405_2.pdf

10. *Buzhan P., Karakash A.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1689. P. 012011.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012011>
11. *Бреховских В.В., Горин А.М., Дятченко В.А., Евдокимов С.В., Зайцев А.А., Изучеев В.И., Медынский М.В., Рыкалин В.И., Садовский С.А., Шангараев А.А.* // ПТЭ. 2024. № 4. С. 5.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80253632>
12. <https://www.manualslib.com/manual/2056163/Sensl-C-Series.html>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Одноэлектронный спектр ФЭУ, полученный при использовании в качестве источника света светодиода. Синей линией показан результат аппроксимации передней части амплитудного спектра нормальным распределением.
- Рис. 2.** Амплитудные спектры БДС-ГЗМ: голубая зависимость – фон, зеленая – ^{241}Am + фон, красная – разность спектров. Напряжение питания ФЭУ – 1350 В.
- Рис. 3.** Скорость счета импульсов гамма-квантов от радиоактивного источника ^{241}Am в зависимости от расстояния до фотокатода ФЭУ вдоль пластины сцинтиллятора. Напряжение питания ФЭУ составляет 1350 В.
- Рис. 4.** Слева – используемая конфигурация WLS-волокон в счетчике с размерами $500 \times 500 \times 50 \text{ мм}^3$; справа – его амплитудный спектр (11.7 АЦП каналов/фотоэлектрон). Наиболее вероятное количество фотоэлектронов в спектре равно 180 при напряжении смещения на SiPM, равном 30 В. Общая длина 5 волокон равна 10.8 м. Минимальный радиус изгиба волокна составляет 50 мм.
- Рис. 5.** Скорость счета темновых импульсов светоизолированного SiPM при напряжении смещения 30 В в зависимости от величины порога регистрации.
- Рис. 6.** Амплитудный спектр космических мюонов одного из SiPM с внешним триггером и зеркалом из майлара на дальнем конце волокон, световыход составляет 312 фэ. Аппроксимация передней части пика в амплитудном спектре нормальным распределением показана красной линией.
- Рис. 7.** Скорости счета совпадений сигналов двух SiPM детектора (временное разрешение 18 нс) показана синими точками; красными и зелеными точками показаны шумы каждого SiPM. Розовые точки – фоновая скорость счета совпадений сигналов от этих же SiPM, отсоединенных от детектора и тщательно светоизолированных. При величинах порога, больших 60 мВ, погрешности измерений для фоновой скорости счета совпадений заходят в отрицательную область и поэтому не могут быть обозначены на графике.
- Рис. 8.** Осциллограммы шумовых импульсов. Скорость развертки осциллографа 5 нс/деление. Разброс начала всех осциллограмм не превышает единиц нс.
- Рис. 9.** Осциллограммы импульсов светодиода с длительностью 20 нс и средним числом фотоэлектронов равным 2.

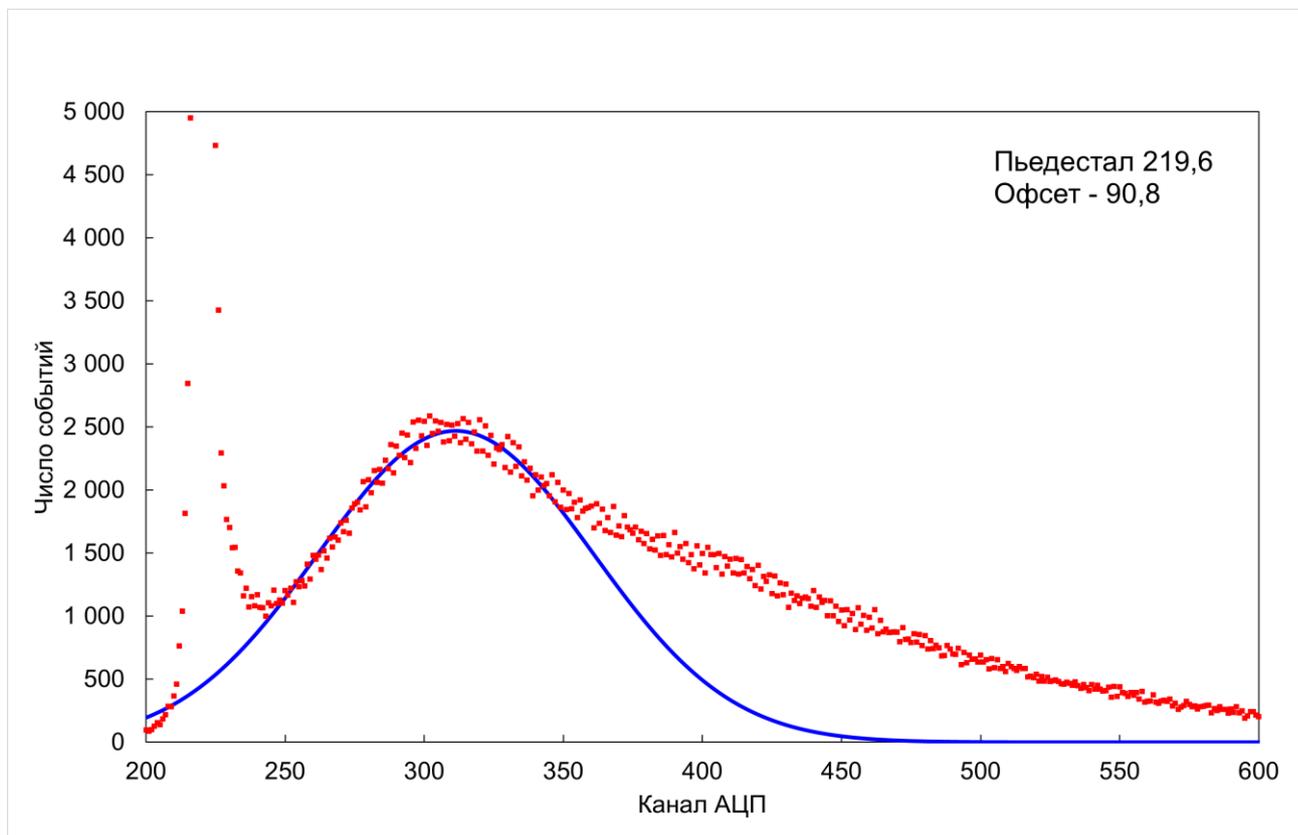


Рис. 1.

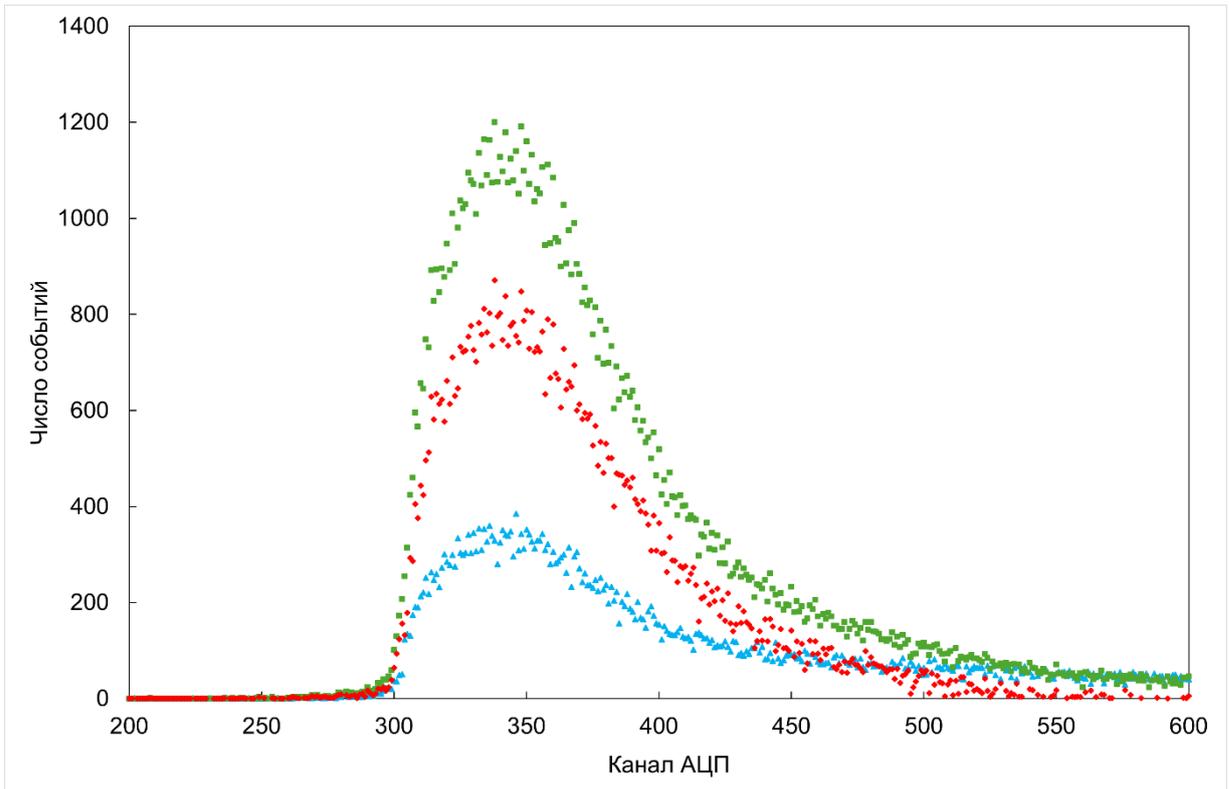


Рис. 2.

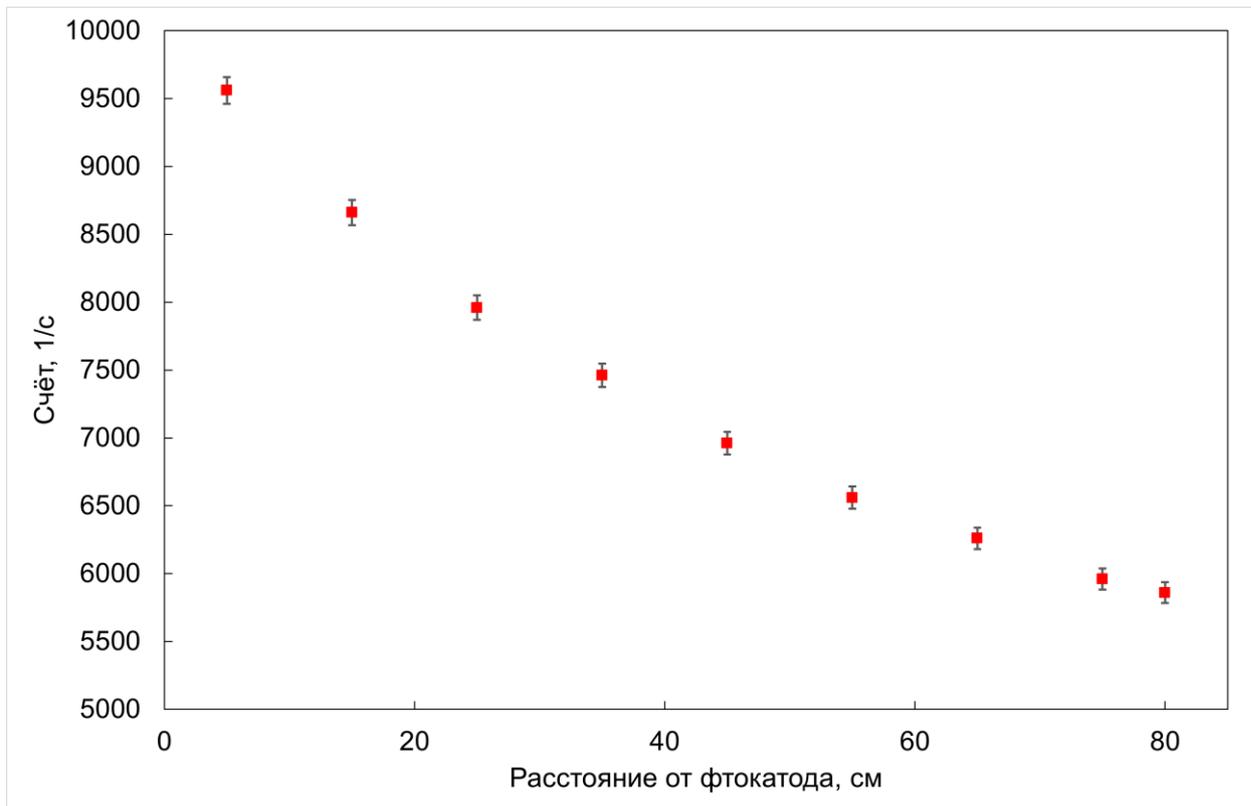


Рис. 3.

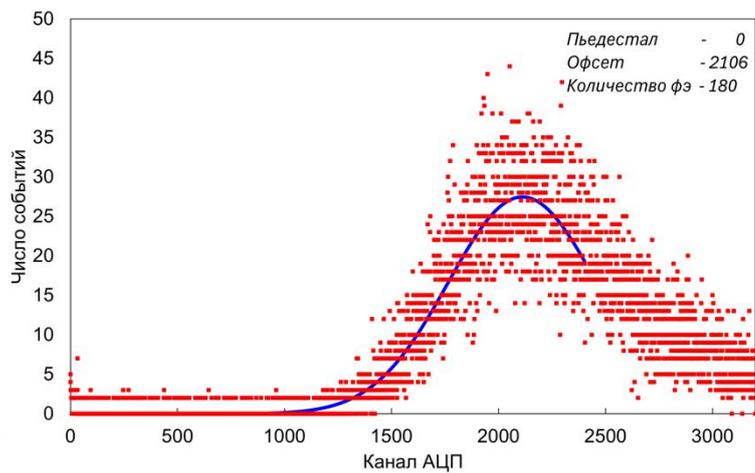
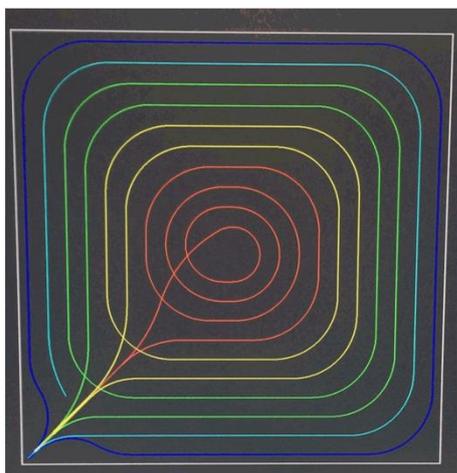


Рис. 4.

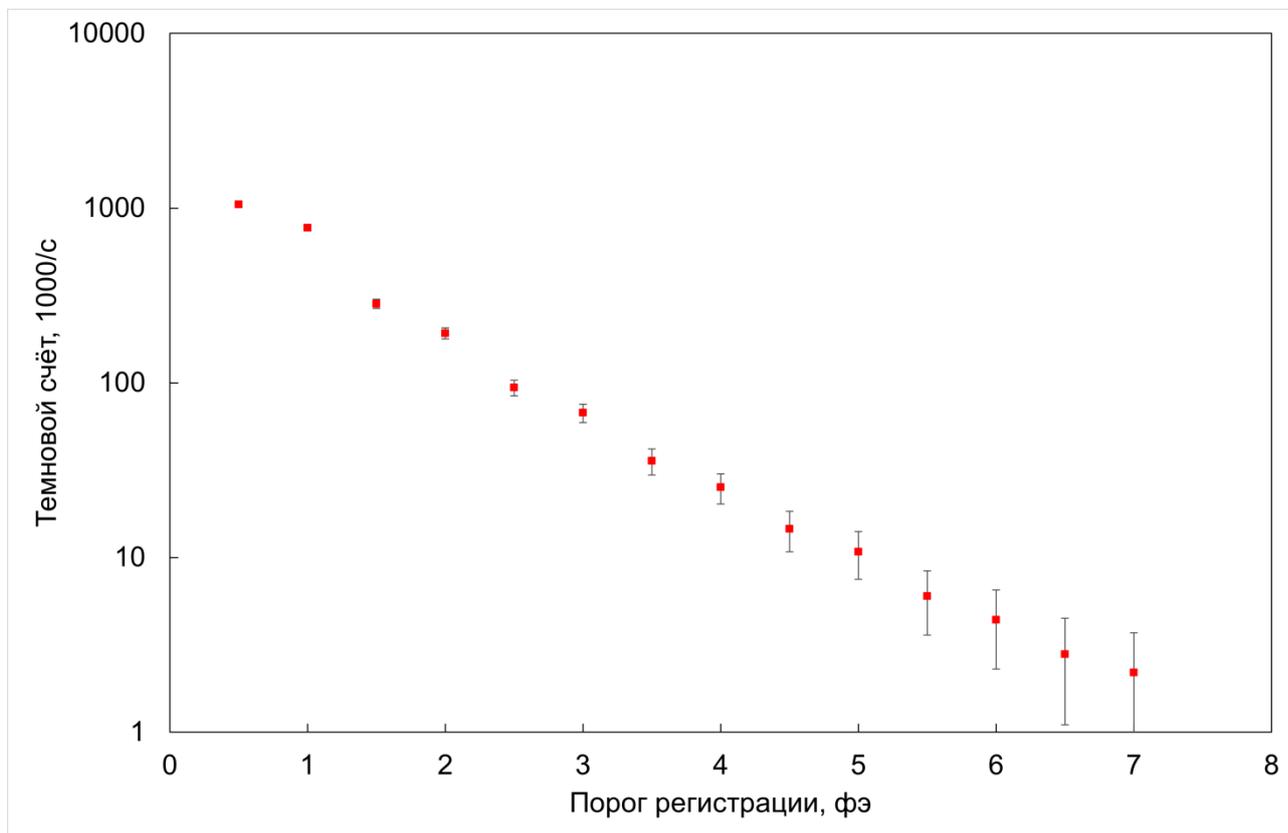


Рис. 5.

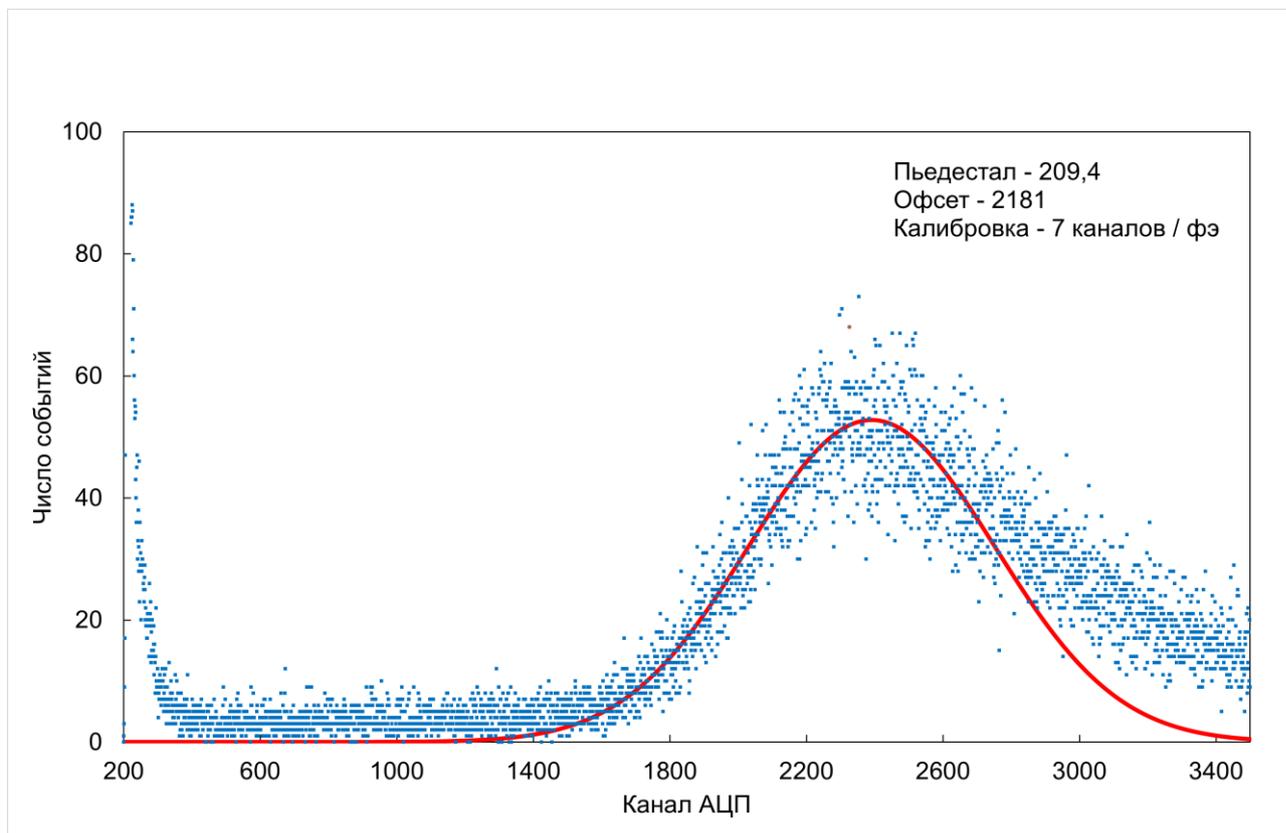


Рис. 6.

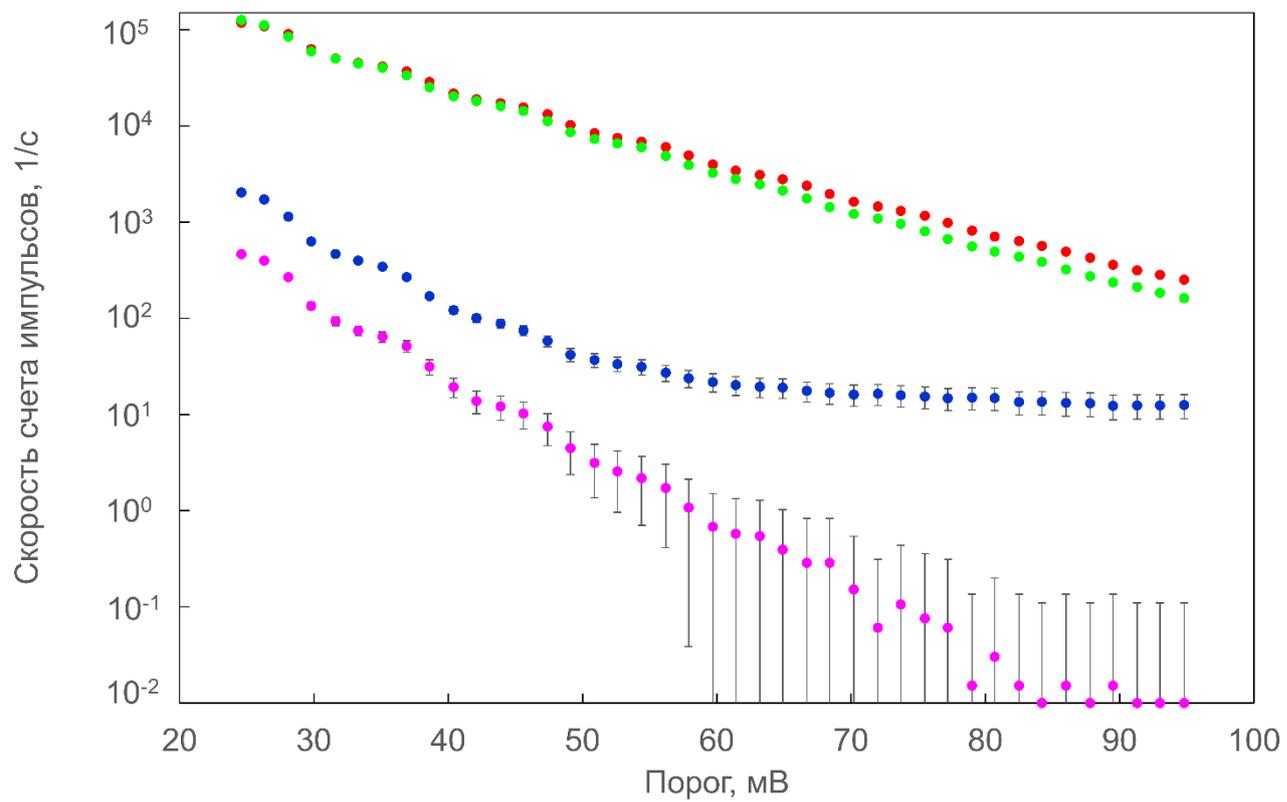


Рис. 7.

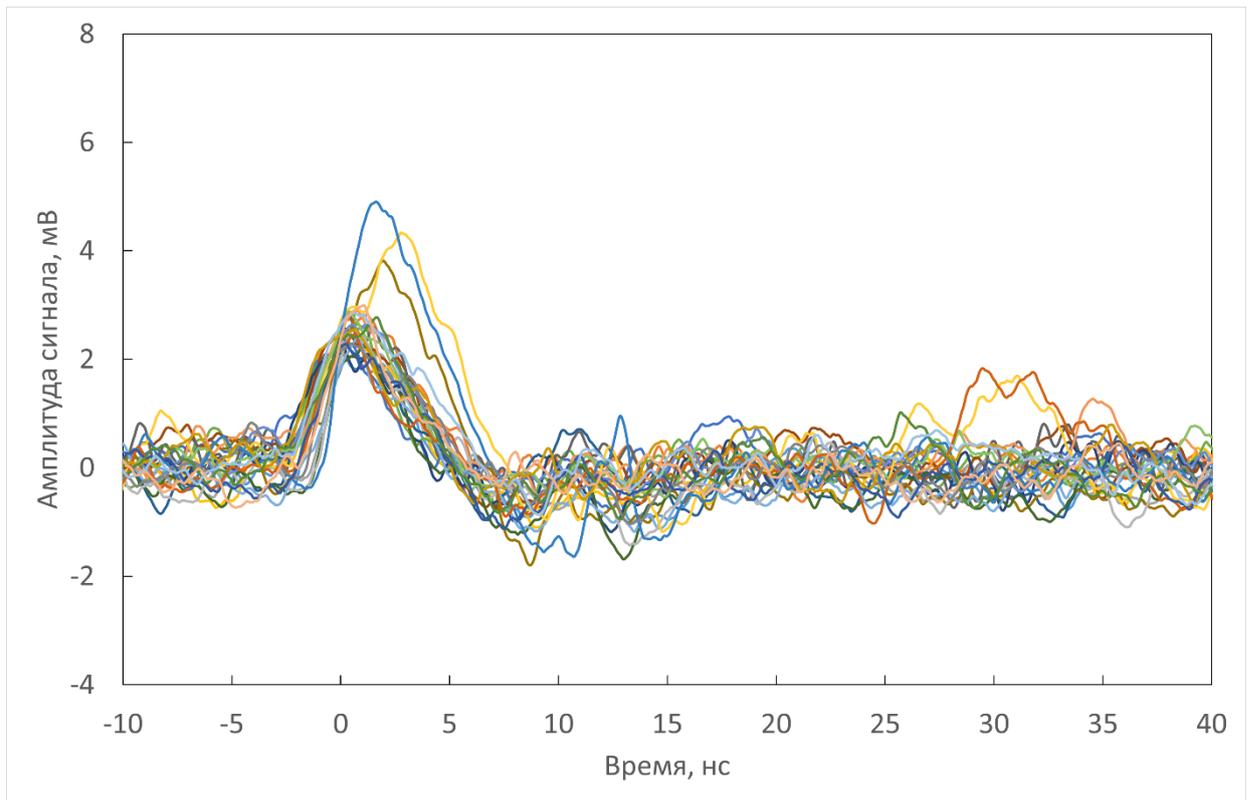


Рис. 8.

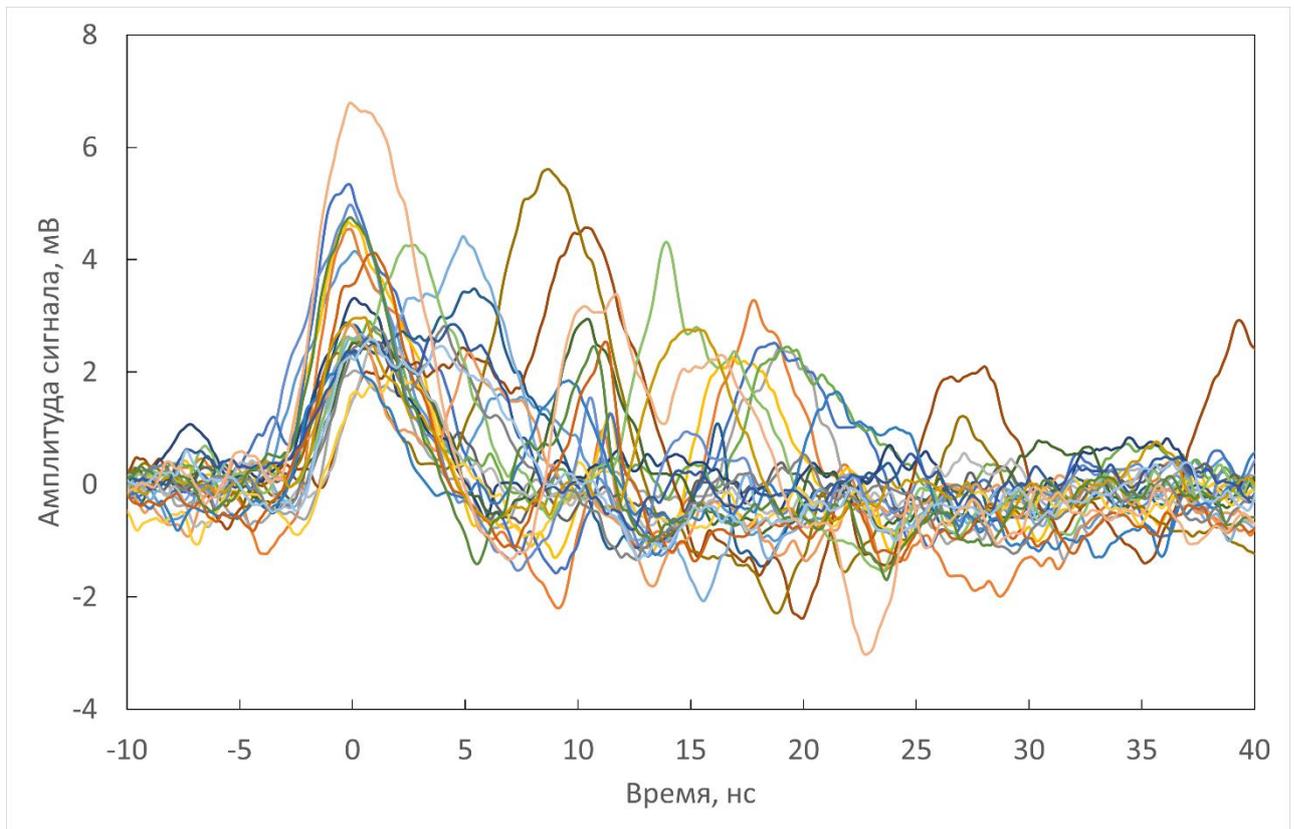


Рис. 9.