

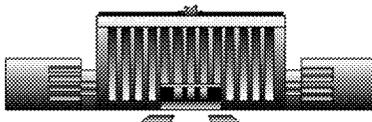


**Минобрнауки России  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИЯФ СО РАН)**

**В. В. Леонов, В. В. Поросев, С. Ю. Таскаев, С. В. Щукин**

**СЧЕТНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ ПОТОКА  
НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ БНЗТ**

**ИЯФ 2025-06**



**НОВОСИБИРСК 2025**

# СЧЕТНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ БНЗТ

В. В. Леонов, В. В. Поросев, С. Ю. Таскаев, С. В. Щукин  
ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск

## Аннотация

С появлением новых источников нейтронов на базе ускорителей для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) возникла необходимость создания независимой системы мониторинга потока частиц во время облучения пациента. Представленные в данной работе результаты показали, что предлагаемая система на базе сцинтиллятор - оптоволоконно - микропиксельный лавинный фотодиод, использующая три различных датчика, позволяет измерять поток нейтронов, а также оценивать локальную дозу, наведенную гамма-излучением. Применение двух типов полистирольных сцинтилляторов - СЦ-301 и обогащенного бором СЦ-331 производства Института физики высокой энергии, г. Протвино - позволяет оценить вклад нейтронов, а использование дополнительного датчика, не имеющего сцинтиллятора, дает возможность оценить вклад в сигнал от черенковского излучения, генерируемого в оптическом волокне. Реализованная система детектирования оптических сигналов на основе кремниевых фотоумножителей обладает высокой квантовой эффективностью, а применение счетного режима регистрации событий, реализованного в считывающей электронике, позволило достичь уровня собственных шумов порядка нескольких десятков Герц. Данный препринт суммирует основные результаты, полученные при разработке данного детектора.

## 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 VITA, который состоит из электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц, литиевой нейтроногенерирующей мишени и системы формирования потока эпитепловых нейтронов [1].

В настоящее время для измерения параметров терапевтических нейтронных пучков используют различные подходы. Во-первых, измеряются интегральные сформированные дозовые профили в фантоме с помощью радиочувствительных гелей [2]. Одновременно с этим активно ведутся исследования по поиску более удобных методов диагностики, позволяющих непосредственно измерять параметры нейтронного потока в процессе облучения. В частности, применяются импульсные газовые камеры деления для измерения потока нейтронов и одновременно используют ионизационные камеры в токовом режиме для измерения сопутствующей дозы гамма излучения [3]. Высокая планируемая интенсивность разрабатываемых ускорительных источников нейтронов, привела к необходимости создания нового поколения сопутствующего диагностического оборудования. В частности, ожидаемый поток эпитепловых нейтронов в процессе терапии составляет  $\sim 10^9$  н/(см $^2$ ·с), а интегральный поток за один сеанс  $\sim 10^{12}$  н/см $^2$  [4].

Примером таких разрабатываемых измерительных систем является компактные сдвоенные тканеэквивалентные пропорциональные счетчики [5]. По сравнению с газовыми детекторами, детекторы на основе сцинтилляторов потенциально позволяют достичь существенно более высокого быстродействия. Кроме того, они значительно более компактны. Так в Японии был разработан сцинтилляционный детектор на основе полимеризуемого сцинтиллятора Bicron BC490, обогащенного порошком LiF, с волоконно-оптическим считыванием информации [6]. Аналогичная конструкция, но на основе сцинтиллятора с бором Bicron BC454 ранее испытывалась этой же группой [ 7 ] (см. рисунок 1). Использование оптического считывания сцинтилляторов через световоды для измерения дозы облучения применяется и в других видах лучевой терапии [ 8 ] и компьютерной томографии [9].

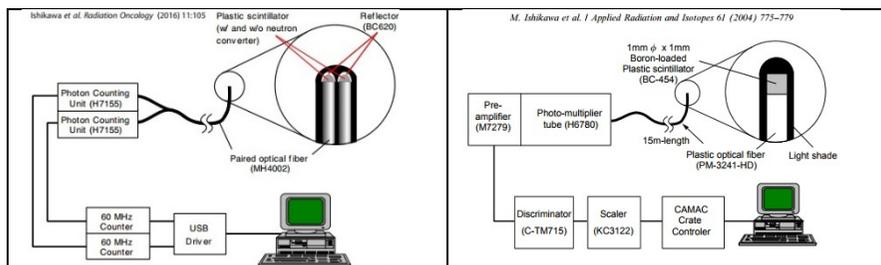
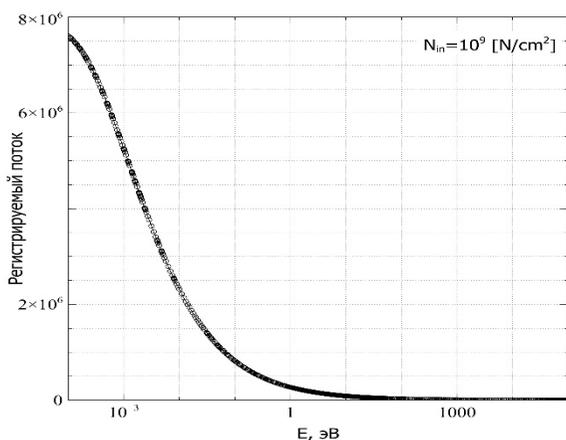


Рисунок 1. Общая схема системы детектирования на основе оптических волокон из работ [6,7].

В начале 2000-х годов в нашей стране в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино) была разработана серия сцинтилляторов на основе полистирола. В частности, был разработан сцинтиллятор СЦ-301 (2% - паратерфенил, 0.2% - РОРОР), который имеет световыход 56–60% от антрацена, максимум люминесценции света в районе 420 нм, время высвечивания около 2 нс, а также сцинтиллятор СЦ-331 с той же основой, но который содержит в себе дополнительно 6% ортокарборана ( $B_{10}H_{10}C_2H_2$ ) [ 10 , 11 ]. Поскольку в

природном боре содержится 19,8%  $^{10}\text{B}$ , который, собственно, захватывает тепловые нейтроны, а массовая доля бора в ортокарборане около 75%, то в ортокарборане содержится примерно 15%  $^{10}\text{B}$ , а соответственно массовая доля  $^{10}\text{B}$  в сцинтилляторе составляет 0,9%. Для детектора на основе такого материала с чувствительным объемом  $\sim 1 \text{ мм}^3$  ожидаемый поток событий будет составлять примерно 2 МГц (см. рисунок 2), что позволяет регистрировать их с минимальными просчетами. Кроме того, использование борсодержащих сцинтилляторов позволяет напрямую моделировать ситуацию с использованием соединений с бором при облучении.



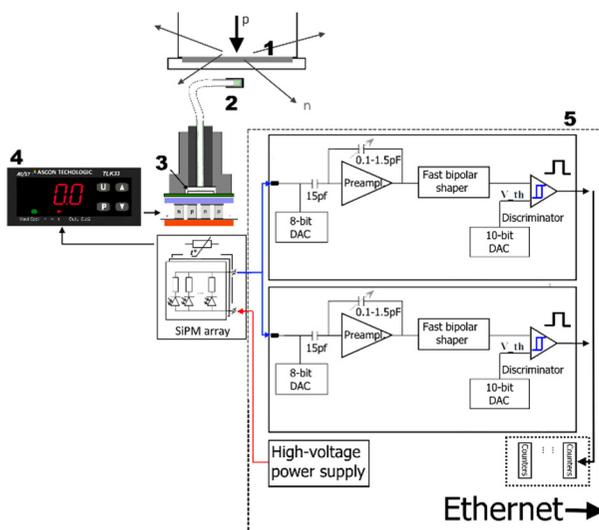
*Рисунок 2. Расчетное число регистрируемых событий, при входном потоке  $10^9 \text{ [n/cm}^2 \cdot \text{c]}$  в зависимости от их энергии.*

В тоже время, из-за значительно более высокой концентрации  $^{10}\text{B}$  в сцинтилляционном материале, по сравнению с тканями пациента где она составляет  $\sim 50$  ppm, чувствительный элемент детектора будет получать гораздо более высокие дозы во время сеанса облучения - порядка 1-10 кГр. Поэтому вопросы исследования радиационной стойкости и стабильности компонентов детектора становятся жизненно важными при его разработке.

## ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА

Датчики предложенного детектора имеют одинаковую конструкцию, каждый из которых содержит три независимых оптических канала регистрации. Первый канал регистрации основан на сцинтилляторе СЦ-331 с бором, второй на основе сцинтиллятора СЦ-301 без бора и третий – оптоволокно без сцинтиллятора. Сцинтилляторы выполнены в виде цилиндров диаметром 1 мм и длиной 1 мм. Сцинтилляторы монтируются на торцы оптоволокна с помощью оптического кремнийорганического каучука (СКТН) и защищены пластиковым светонепроницаемым корпусом. Боковые стороны сцинтиллятора, а также торец третьего оптоволокна покрыты светоотражающим покрытием. Свет от сцинтилляторов передается по световодам к считывающей электронике, а регистрация оптических импульсов осуществляется с помощью микропиксельных лавинных фотодиодов (SiPM). Число зарегистрированных событий с амплитудой выше определенного порога с интервалом 10 мс передается в компьютер для дальнейшей обработки. Тот факт, что сцинтилляторы, обогащенные бором, и сцинтилляторы, не содержащие бора, имеют несколько разный световыход, приводит к необходимости использования двух различных порогов детектирования в считывающей электронике. В процессе работы программа управления контролирует температуру платы, на которой смонтированы фотодиоды, и регулирует при необходимости напряжение их смещения для поддержания постоянного коэффициента усиления. Кроме того, для уменьшения величины собственных шумов микропиксельных лавинных фотодиодов, все фотоприемники охлаждаются до температуры  $\sim 0^\circ \text{C}$  с помощью элемента Пельтье. Разница в отсчетах двух датчиков с бором и без бора позволяет оценить вклад нейтронной компоненты, регистрируемой датчиком. Разность же отсчетов в канале детектора без бора и числа событий, зарегистрированных в канале без сцинтиллятора, дает сигнал, пропорциональный дозе гамма-излучения в точке измерения, поскольку

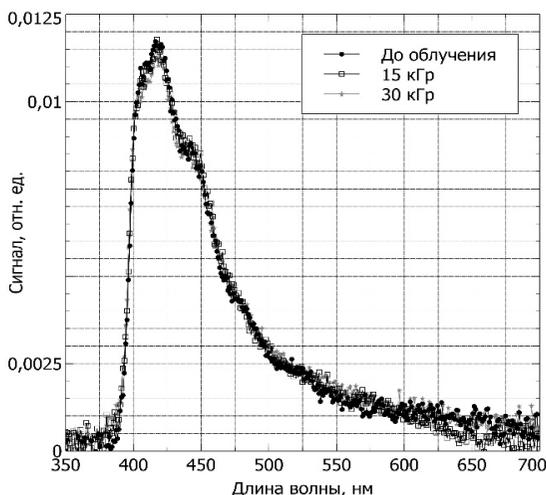
позволяет исключить вклад черенковского излучения, образующегося в оптоволокне. На рисунке 3 показана упрощенная блок-схема электроники регистрации на основе специализированных микросхем для работы с микропиксельными лавинными фотодиодами OMEGA EASIROC (в новой версии CITIROC) [12]. В данном варианте электроники для получения возможности работы с двумя различными порогами регистрации в каждом канале выход каждого SiPM подключен одновременно ко входам двух микросхем. Выходы дискриминаторов подключены к 16-разрядным счетчиками, реализованных в программируемой логической матрице, и передача накопленных данных на компьютер осуществляется путем передачи Ethernet-пакетов.



*Рисунок 3. Блок-схема электроники регистрации (1 – нейтрон-генерирующая мишень, 2 – датчик, 3 – микропиксельный лавинный фотодиод, 4 – контроллер элементов Пельтье, 5 – считывающая электроника).*

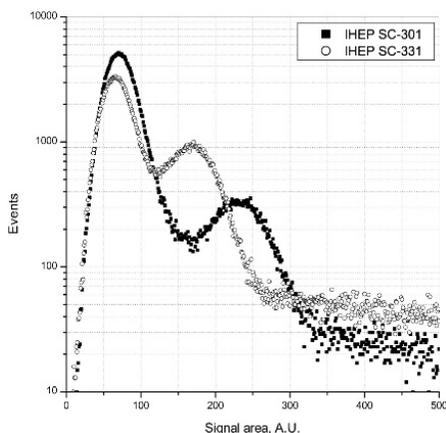
## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Спектр флуоресценции сцинтиллятора СЦ-301 был измерен посредством пропускания излучения ультрафиолетового (УФ) светодиода (UVTOP300-NL-TO39, ROITHNER LASERTECHNIK GmbH) с длиной волны 305 нм, вблизи максимума фотопоглощения первичного флуорофора, через образец толщиной 1 мм и последующего измерения спектра эмиссии образца. Спектральные данные измерялись на стенде на базе монохроматора МДР-12У (ЛОМО, Санкт-Петербург), оснащенного фотодиодом С10439-03 (НАМАМАТСУ). Также, для оценки эффектов радиационного старения, мы проводили облучение тестовых образцов с использованием промышленного ускорителя электронов ИЛУ-10 (ИЯФ, г. Новосибирск), обеспечивающего фиксированную дозу облучения 15 кГр [13]. На рисунке 4 показаны спектры излучения образца сцинтиллятора до и после нескольких последовательных облучений. Как и ожидалось, при заданном уровне дозы форма спектра излучения тестовых образцов существенно не меняется [14]. Световой выход сцинтиллятора определялся следующим образом. Для измерений были изготовлены образцы сцинтилляторов размерами 9 x 9 x 5 мм, все грани которых были отполированы. Верхняя и боковые грани были покрыты краской EJ-510 (EJen Technology). Во время тестов, сцинтилляторы монтировали с помощью оптической смазки BC-630 (Saint-Gobain Crystals) на входное окно фотоэлектронного умножителя R10233 (НАМАМАТСУ). Рабочее напряжение для ФЭУ -950 В формировалось цифровым многоканальным анализатором DT5780 (CAEN) и подавалось с помощью делителя напряжения E1198-26 (НАМАМАТСУ) на ФЭУ. Выходной сигнал с нагрузки сопротивлением 50 Ом интегрировался с помощью оцифровщика сигналов DT5720 (CAEN).



*Рисунок 4. Спектры излучения сцинтиллятора до и после облучения*

Для оценки относительного светового выхода двух сцинтилляторов мы измерили спектры в режиме интегрирования заряда, используя изотоп Am-241 в качестве источника гамма-излучения. На рисунке 5 представлены результаты таких измерений.



*Рисунок 5. Амплитудный спектр источника Am-241, измеренный с помощью различных сцинтилляторов.*

Достаточно большой размер сцинтилляторов позволил наблюдать в данных фотопики от фотонов с энергией 59,5 кэВ. Среднее значение сигнала составило 229 отн.ед. и 171 отн.ед. для СЦ-301 и СЦ-331 соответственно. Это означает, что относительная яркость сцинтиллятора, обогащенного бором, составляет 75% от яркости сцинтиллятора без бора.

В дальнейшем, с учетом проведенных калибровок, учетом спектральной чувствительности фотоумножителя и коэффициента отражения фотокатода, было получено абсолютное значение световыхода сцинтиллятора равное 8600 фотонов/МэВ [15].

Для измерения величины сигнала от событий, связанных с регистрацией тепловых нейтронов, мы установили стенд на ускорительном источнике нейтронов ВИТА и получали данные во время тестовых сеансов работы ускорителя. Чтобы оценить эффект наведенной радиоактивности в помещении, мы также накапливали распределения амплитуд фоновых сигналов, когда ускоритель был выключен, в течение сопоставимого времени. Результаты измерений показаны на рисунке 6.

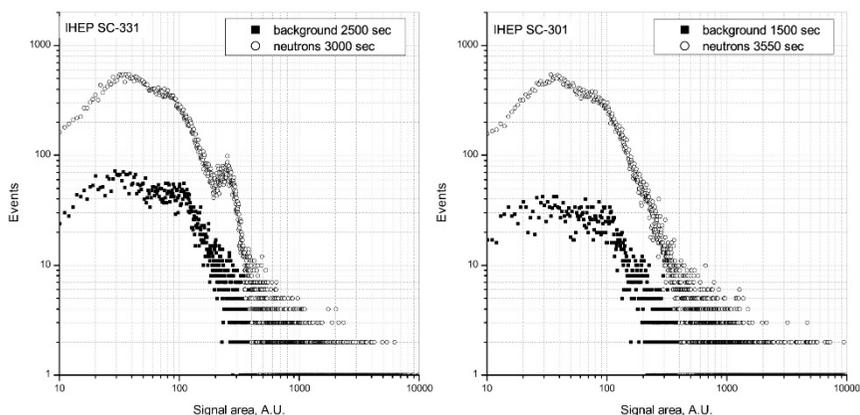


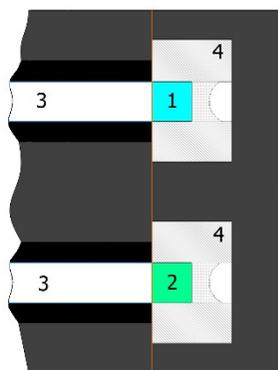
Рисунок 6. Амплитудные спектры сцинтилляторов с (слева) и без (справа) бора.

В спектре, полученном с помощью СЦ-331, отчетливо различим пик, связанный с регистрацией нейтронов, со средним значением сигнала 259 отн.ед.

Как и ожидалось, при регистрации тяжелых заряженных частиц сцинтилляторы демонстрируют значительную непропорциональность световыхода [16]. Из сравнения с данными, полученными с Am-241, следует что световой сигнал при регистрации тепловых нейтронов эквивалентен сигналу от  $\beta$ -частиц с энергией около 90 кэВ.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ СЕНСОРОВ

Количество регистрируемых фотонов зависит как от свойств оптических волокон, обеспечивающих транспортировку света до фотодетектора, так и определяется конструкцией чувствительного элемента детектора. Для оценки влияния различных факторов на светосбор, мы провели моделирование с использованием пакета 'GEANT4'. Детальная информация о параметрах моделирования представлена в работе [17], а конструкция датчика схематически показана на рисунке 7.



*Рисунок 7. Общая конструкция датчика. 1- сцинтиллятор с бором, 2 – сцинтиллятор без бора, 3 – оптическое волокно, 4 – светотражающее покрытие.*

В процессе моделирования сравнивались два различных типа покрытия на боковые полированные поверхности сцинтиллятора: диффузно рассеивающая свет белая краска EJ-510 (Ejjen Technology) и зеркально отражающее алюминиевое напыление. Кроме того, изучались эффекты связанные с различной формой сцинтиллятора. Результаты моделирования для ожидаемого числа зарегистрированных оптических фотонов показаны в таблице 1. Для сравнения, среднее число образующихся фотонов при регистрации нейтронов  $\sim 630$ .

*Таблица 1. Ожидаемое число зарегистрированных оптических фотонов для датчика с пластиковым оптическим волокном длиной 8.5 м.*

<b>Форма сцинтиллятора</b>	<b>Покрытие</b>	<b>Число зарегистрированных фотонов</b>
Цилиндр	Все стороны: EJ-510	33.7
Цилиндр	Боковая сторона: EJ-510, Торец: Al	28.9
Цилиндр	Боковая сторона: Al Торец: EJ-510	25.6
Цилиндр	Все стороны: Al	15.6
Полусфера	EJ-510	35.3
Полусфера	Al	19.4

Из результатов моделирования следует что низкая вероятность захвата света оптическими волокнами приводит к тому, что только  $\sim 5\%$  оптических фотонов, произведенных в объеме сцинтиллятора регистрируется в детекторе. Нанесение зеркального алюминиевого покрытия не дает никаких преимуществ по сравнению с белой краской, обеспечивающей диффузное рассеяние света. Кроме того, интегрально она имеет более высокий коэффициент

отражения света. Поэтому, в дальнейшем, мы использовали отражатели на основе краски EJ-510, а также MgO. Хотя сцинтиллятор в форме полусферы позволяет получить несколько более высокое значение сигнала, в дальнейших экспериментах мы использовали только цилиндрические сцинтилляторы, которые проще в производстве и позволяют добиться лучшей повторяемости результатов.

Еще одним интересующим нас эффектом является возможная связь между каналами регистрации из-за близкого расположения сцинтилляторов в корпусе датчика. Так поглощение нейтрона  $^{10}\text{B}$  в обогащенном бором сцинтилляторе с вероятностью 94% приводит к образованию возбужденного ядра  $^7\text{Li}$ , которое испускает гамма-квант с энергией 478 кэВ. Испускаемые гамма-лучи могут быть зарегистрированы в сцинтилляторе соседнего канала и создать дополнительный сигнал. Из результатов проведенного моделирования следует, что несмотря на близость двух элементов детектора друг к другу, величина сигнала, индуцируемого в соседнем канале фотонами, образующимися в результате реакции захвата в сцинтилляторе с бором, составляет примерно  $10^{-5}$  и может считаться пренебрежимо малой.

## СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

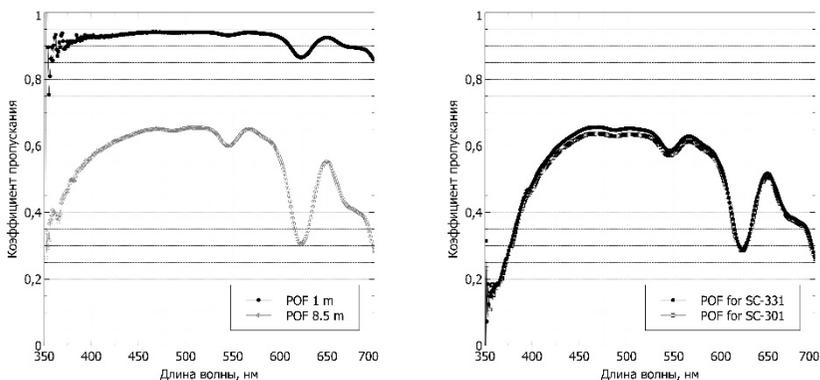
Основными характеристиками оптических волокон является их числовая апертура и ослабление излучения на единице длины. Числовая апертура определяется как:

$$NA = \sin(\theta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

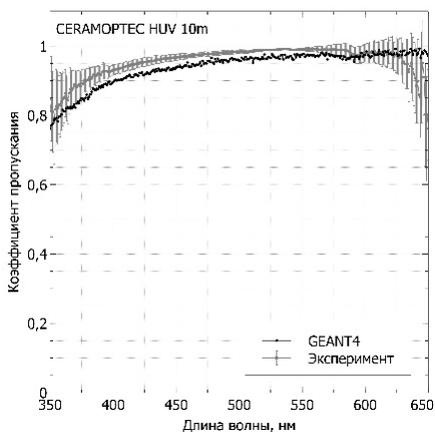
где  $n_1$ ,  $n_2$  показатели преломления сердцевины и оболочки соответственно. Так для волокна с сердцевиной из PMMA  $n_1=1.49$  и оболочкой с  $n_2=1.40$ , числовая апертура равна 0.5 и соответственно максимальный угол захвата света  $\theta_{max} = 30$  град.

В первоначальной версии детектора, для передачи света к фотоприемникам, мы использовали пластиковый оптоволоконный кабель ASAHI SC-1000 (Япония) с диаметром сердцевины из PMMA - 1 мм. Несмотря на большое значение числовой апертуры  $NA=0.6$  данный тип кабеля имеет существенное поглощение в области максимума эмиссии сцинтиллятора  $\sim 40\%$  при длине 8.5 м и, кроме того, пластиковые оптоволоконные кабели продемонстрировали ограниченную радиационную стойкость [ 18 ]. Рисунок 8 демонстрирует результат измерения оптической прозрачности волокна, до и после проведения экспериментов с датчиками на установке БНЗТ. В последнем случае, интегральный заряд тока протонов на нейтронгениерирующую мишень составил  $\sim 356$  Кл.

Заметная деградация пластиковых волокон после облучения в коротковолновой части спектра, а также заметное собственное ослабление оптических сигналов выявили необходимость поиска альтернативного решения. В новой версии детектора мы применили кварцевое волокно диаметром 1 мм фирмы CeramOptec HUV (Германия) с числовой апертурой  $NA=0.5$ . Меньший угол захвата света у данного волокна компенсируется существенно возросшим светопропусканием. Рисунок 9 демонстрирует результат измерения оптической прозрачности данного волокна. Для сравнения на этом же рисунке представлены результаты моделирования светопропускания волокна в пакете GEANT4. Из рисунка видно, что моделирование позволяет получить результаты которые совпадают с результатами эксперимента в пределах 2% и, соответственно, могут быть использованы в дальнейших расчетах по оптимизации конструкции детектора.



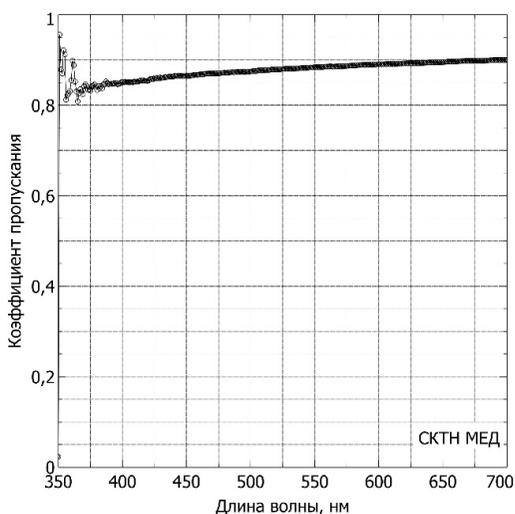
*Рисунок 8. Спектр пропускания POF ASAHI SB-1000 длиной 1 и 8.5 м до облучения (слева) и после облучения для двух датчиков.*



*Рисунок 9. Спектр пропускания кварцевого волокна CeramOptec HUV.*

Аналогичным образом выглядит проблема присоединения сцинтиллятора к оптическим волокнам. Использование эпоксидных компаундов требует проверки стабильности их оптических свойств под облучением. При этом, например, компаунды, демонстрирующие высокую радиационную стойкость, такие как ПЭО-490КЭ и ПЭО-490МЭ (Лаборатория физики полимеров СПбГТИ), могут

быть непригодны для практического использования с пластиковыми сцинтилляторами ввиду специфичности их применения, в частности температуре отверждения 110-120 °С. Наиболее подходящим материалом для монтажа сцинтиллятора оказался СКТН-МЕД - низкомолекулярный кремнийорганический каучук (СУРЭЛ, Россия). На рисунке 10 показан коэффициент прохождения через тестовую пластину толщиной 3 мм, после облучения дозой 15 кГр. В пределах точности измерений, это характеристика полностью совпадает с аналогичной характеристикой до облучения.

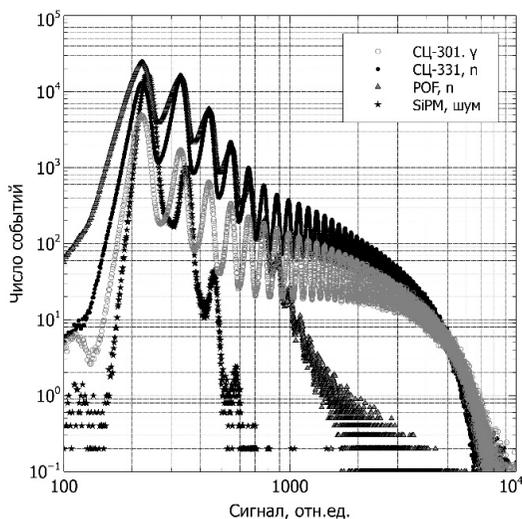


*Рисунок 10. Спектр пропускания СКТН-МЕД.*

## **АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ СИГНАЛОВ**

Амплитудные спектры сигналов в каналах регистрации измерялись при установке датчиков непосредственно на нейтроногенерирующую мишень. Оптические импульсы на выходе световодов детектировались МРРС S13360-3050CS (НАМАМАТСУ), далее усилителем на базе THS3202 (Texas Instruments) и обрабатывались цифровой системой сбора данных DT5790 (CAEN) в режиме

интегрирования заряда в течение интервала времени 32 нс. Во время испытаний температура МРРС стабилизировалась на уровне 0 °С. На рисунке 11 показаны: шум SiPM при выключенном ускорителе; сигналы со сцинтилляторов СЦ-301 при работе ускорителя ниже порога образования нейтронов; сигналы со сцинтилляторов СЦ-331 (обогащенных бором) при работе ускорителя в режиме генерирования нейтронов; сигналы с РОФ без сцинтиллятора при нейтронном облучении.

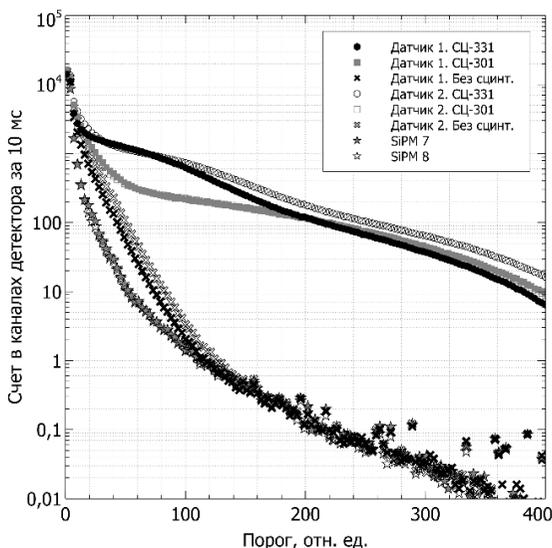


*Рисунок 11. Амплитудные спектры сигналов в различных каналах регистрации.*

Уникальные свойства SiPM позволяют различить сигналы от одного, двух, трех и т. д. зарегистрированных оптических фотонов. Каждый пик в распределении соответствует одновременной регистрации N-го количества фотонов. Из представленных данных видно, что в области сигналов ниже 10 фотоэлектронов определяющий вклад дают собственный шум SiPM и черенковский свет, генерируемый вторичными высокоэнергетическими электронами в оптоволокне. При работе ускорителя в режиме генерирования нейтронов спектр сигналов со сцинтиллятора СЦ-331

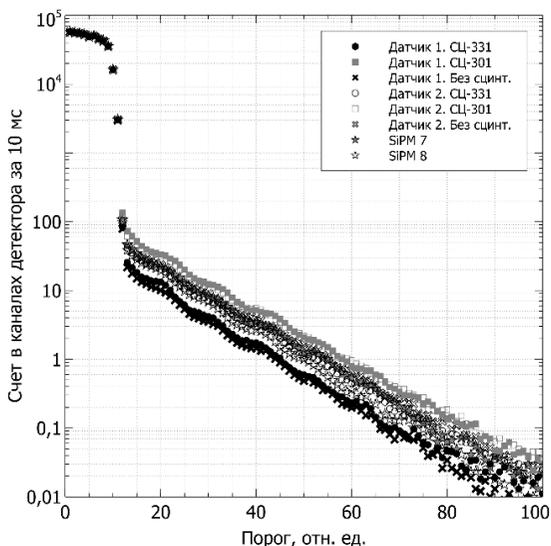
демонстрирует избыток событий с низкой амплитудой по сравнению с СЦ-301, однако события, связанные с регистрацией нейтронов не образуют четко выделенного пика на фоновом уровне как это было для сцинтилляторов, установленных непосредственно на входное окно ФЭУ. Основной причиной этого эффекта является низкий светосбор, образующегося в сцинтилляторе света, который в основном определяется числовой апертурой используемых оптических волокон. Кроме того, как и ожидалось, сцинтиллятор СЦ-301 имеет несколько больший световыход и, как следствие, дает большую амплитуду импульсов.

Аналогичные результаты для детектора в режиме счета событий выше порога и датчиками с кварцевыми волокнами CeramOptec. На рисунке 12 показана величина счета в каналах детектора в зависимости от порога регистрации для двух подключенных датчиков при облучении их потоком нейтронов.



*Рисунок 12. Зависимость счета в каналах регистрации от величины порога для двух датчиков и двух отдельно стоящих диодов (SiPM7, SiPM8) при облучении нейтронами.*

Представленные зависимости более наглядно демонстрируют избыток счета в каналах с сцинтилятором обогаченным бором. Так же, для сравнения, в каналах SiPM7 и SiPM8 показаны собственные шумы микропиксельных лавинных фотодиодов без каких-либо подключенных к ним в этот же момент датчиков. Видно, что в области малых порогов и соответственно малых амплитуд сигналов, собственные шумы существенно меньше чем вклад от черенковского излучения, генерируемого в кварцевом волокне. Для сравнения на рисунке 13 показан уровень шумов в тех же каналах в лабораторных условиях.



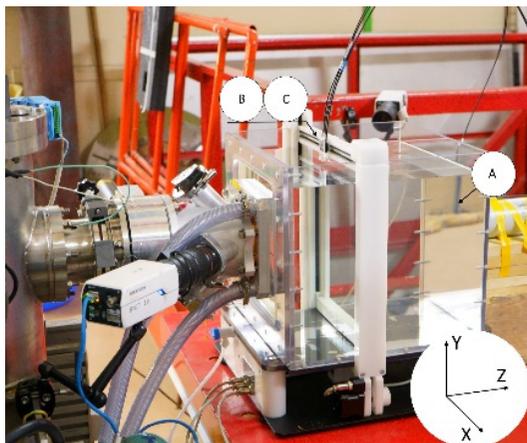
*Рисунок 13. Зависимость счета шумовых импульсов в каналах регистрации от величины порога в лабораторных условиях.*

В процессе измерения характеристик детектора интегральный заряд протонов на нейтрон генерирующей мишени составил  $\sim 70$  Кл (10 мА·часов). На данном масштабе датчики на кварцевом волокне не показали заметной деградации параметров и поэтому вопросы радиационной стойкости требуют дальнейшего исследования. Наблюдаемый

разброс сигналов между датчиками объясняется технологическим разбросом их параметров при изготовлении, что компенсируется путем предварительной калибровки датчиков на источнике рентгеновского излучения. К сожалению кварцевое волокно CeramOptec имеет недостаточную защиту от окружающего света в виду меньшей толщины защитного полиэтиленового покрытия - 200 мкм по сравнению с толщиной оболочки 500 мкм на пластиковых волокнах ASAHI и, поэтому, требует установки дополнительных светозащитных экранов в экспериментах.

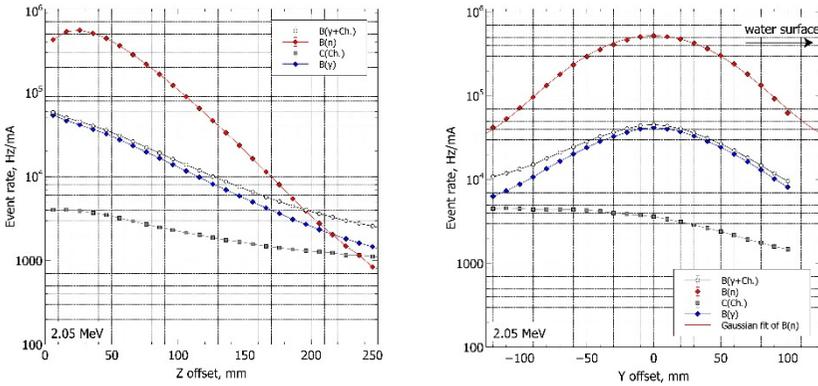
## ИЗМЕРЕНИЯ НА ИСТОЧНИКЕ НЕЙТРОНОВ

Примером применения разработанной системы является измерение пространственных распределений потоков тепловых нейтронов на установке БНЗТ с использованием водного фантома [19].



*Рисунок 14. Экспериментальная установка с водным фантомом, установленным сразу за нейтрон-генерирующей мишенью. Стрелки показывают положение датчиков: А (за резервуаром с водой), В и С на подвижной каретке.*

В процессе измерения, каретка с закрепленными на ней датчиками перемещается внутри водного объема и, таким образом, мы можем измерять искомые пространственные распределения. В данном эксперименте датчик **B** был смонтирован с использованием сцинтилляторов СЦ-331 и СЦ-301, а датчик **C** представлял собой только оптические волокна без сцинтилляторов. Примеры полученных в эксперименте распределений показаны на рисунке 15.



*Рисунок 15. Регистрируемый поток событий в каналах детектора вдоль оси Z (слева) и вдоль оси Y вблизи положения максимума дозы от нейтронов (справа) при энергии протонного пучка 2,05 МэВ.*

Разница в отчетах двух каналов регистрации датчика **B** (с бором и без бора) позволяет оценить вклад нейтронной компоненты  $V(n) = V(n+\gamma+Ch.) - V(\gamma+Ch.)$ . Разница в отчетах в канале датчика без бора  $V(\gamma + Ch.)$  и количестве зарегистрированных событий  $C(Ch.)$  датчиком без сцинтиллятора, обусловленных черенковским излучением, генерируемым в оптоволокне, дает сигнал, пропорциональный локальной дозе гамма-излучения,  $V(\gamma) = V(\gamma + Ch.) - C(Ch.)$ .

Из представленных данных видно, что хотя вклад в дозу облучения от нейтронов является определяющим, вклад в дозу от гамма-излучения также вносит существенный вклад,

особенно на больших расстояниях от мишени и требует учета при планирования лечения. Использование данных с датчика без сцинтиллятора позволяет учесть вклад черенковского излучения и корректно восстановить локальную дозу от гамма излучения.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ИЯФ СО РАН разработана система мониторинга потока нейтронов на установке для БНЗТ на основе оптоволоконного датчика и микропиксельных лавинных фотодиодов. В данной работе мы протестировали «трехсенсорный» подход к измерению распределения дозы о разных компонент излучения на установке БНЗТ ВИТА. Результаты, полученные с использованием водного фантома показывают, что предлагаемая система может использоваться для одновременного мониторинга нейтронных и гамма-потоков. Применение микропиксельных лавинных фотодиодов вместо вакуумных фотоумножителей значительно упростило конструкцию системы и позволило реализовать компактную многоканальную систему сбора данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- <sup>1</sup> Taskaev S. et al. *Neutron source based on vacuum insulated tandem accelerator and lithium target* //Biology. – 2021. – Т. 10. – №. 5. – С. 350.
- <sup>2</sup> Jouni Uusi-Simola et.al *MAGIC polymer gel for dosimetric verification in boron neutron capture therapy*. Radiation Measurements. Volume8, Issue2, 2007, pp. 114-123, <https://doi.org/10.1120/jacmp.v8i2.2409>
- <sup>3</sup> Vesa Tanner et.al *On-line neutron beam monitoring of the Finnish BNCT facility*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 422 (1999) pp. 101—105. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)01071-7](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01071-7)
- <sup>4</sup> 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)
- <sup>5</sup> D. Moro et al., *BNCT dosimetry performed with a mini twin tissue-equivalent proportional counters (TEPC)*. Applied Radiation and Isotopes 67 (2009) S171–S174, <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.03.042>
- <sup>6</sup> Ishikawa, M., Yamamoto, T., Matsumura, A. et al. *Early clinical experience utilizing scintillator with optical fiber (SOF) detector in clinical boron neutron capture therapy: its issues and solutions*. Radiat. Oncol. 11, 105 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13014-016-0680-0>
- <sup>7</sup> Ishikawa M, Ono K, Sakurai Y, Unesaki H, Uritani A, Bengua G, et al. *Development of real-time thermal neutron monitor using boron-loaded plastic scintillator with optical fiber for boron neutron capture therapy*. Appl Radiat Isot. 2004; 61(5):775–9 <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.05.053>
- <sup>8</sup> G. Kertzscher, S. Beddar. *Ruby-based inorganic scintillation detectors for <sup>192</sup>Ir brachytherapy*. Phys. Med. Biol. 61 (2016) pp.7744-7764 <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/21/7744>
- <sup>9</sup> Hoerner M. R., Stepusin E. J., Hyer D. E., Hintenlang D. E., *Characterizing energy dependence and count rate performance of a dual scintillator fiber-optic detector for computed tomography*. Med Phys. 2015 Mar;42(3):1268-79. <https://doi.org/10.1118/1.4906206>
- <sup>10</sup> I.G. Britvich et al. *New Polystyrene-Based Scintillators*. Instruments and Experimental Techniques. Volume 45. Issue 5. (2002) pp. 644-655. <https://doi.org/10.1023/A:1020402001190>
- <sup>11</sup> Бритвич Г.И. и др. *Основные характеристики полистирольных сцинтилляторов производства ИФВЭ*: Препринт ИФВЭ 2013-23. – Протвино, 2013
- <sup>12</sup> S. Callier, C.D. Taille, G. Martin-Chassard, L. Raux, *EASIROC, an easy and versatile ReadOut device for SiPM*. Physics Procedia 37 (2012) pp.1569-1576 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.02.486>

- <sup>13</sup> V. Auslender et al. *Electron Accelerator for Energy up to 5.0 MeV and Beam Power up to 50 kW with X-ray Converter*. Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland.  
<https://accelconf.web.cern.ch/e04/PAPERS/THPKF050.PDF>
- <sup>14</sup> Z. Li et al. *Properties of plastic scintillators after irradiation*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A552, Issue 3 (2005), pp. 449-455 <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.06.075>
- <sup>15</sup> V.V. Porosev, G.A. Savinov. *Evaluation of boron-enriched plastic scintillator for thermal neutron detection*. 2019 JINST 14 P06003 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/P06003>
- <sup>16</sup> A. Nassalski et al. *Non-Proportionality of Organic Scintillators and BGO*. IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 55, no. 3, (2008) pp. 1069-1072 <https://doi.org/10.1109/TNS.2007.913478>
- <sup>17</sup> T.A. Bykov, D.A. Kasatov, A.M. Koshkarev, A.N. Makarov, V.V. Porosev, G.A. Savinov, I.M. Shchudlo, S.Yu. Taskaev. *A multichannel neutron flux monitoring system for a boron neutron capture therapy facility.*, 2019 JINST 14 P12002, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/12/P12002>
- <sup>18</sup> T.A. Bykov, D.A. Kasatov, A.M. Koshkarev, A.N. Makarov, V.V. Porosev, G.A. Savinov, I.M. Shchudlo, S.Yu. Taskaev, G.D. Verkhovod. *Initial trials of a dose monitoring detector for boron neutron capture therapy*. Journal of Instrumentation, Volume 16, (2021) P01024 <https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/01/P01024>
- <sup>19</sup> T.A. Bykov, D.A. Kasatov, A.M. Koshkarev, A.N. Makarov, V.V. Leonov, V.V. Porosev, G.A. Savinov, S.S. Savinov, I.M. Shchudlo, S.Yu. Taskaev, G.D. Verkhovod. *Evaluation of depth-dose profiles in a water phantom at the BNCT facility at BINP*. Journal of Instrumentation, Volume 16, P10016(2021) <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/16/10/P10016>

**СЧЕТНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ ПОТОКА  
НЕЙТРОНОВ НА УСТАНОВКЕ БНЗТ**

**В. В. Леонов, В. В. Поросев, С. Ю. Таскаев, С. В. Щукин  
ИЯФ СО РАН**

**Препринт ИЯФ 2025-06**

Ответственный за выпуск М.В.Кузин

Работа поступила 17.07.2025 г.

---

Сдано в набор 18.07.2025 г.

Подписано в печать 18.07.2025 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 0.6 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №6

---

Обработано на РС и отпечатано в ИЯФ СО РАН

*Новосибирск, 630090, пр. Лаврентьева, 11.*