

УДК 538.958

Оригинальная статья

**О возможности использования нафталиновых кристаллов при
получении жидких органических сцинтилляторов для использования
в нейтринной физике**

А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, Д.Н. Ермоленко, А.З. Кашежев
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

360004, Россия, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, ул. Чернышевского, 173
al-aneta@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.148

Аннотация: В работе представлены результаты комплексного исследования новых сцинтилляционных систем на основе синтина и додекана с добавлением нафталина и 2,5-дифенилоксазола. Впервые продемонстрировано, что оптимизация концентрации нафталина и прямая спектральная согласованность с диапазоном чувствительности фотоприёмников позволяют достичь световыхода, превышающего аналогичные параметры стандартных растворов на основе псевдокумола. Было установлено, что при концентрации нафталина 100 г/л формируются эксимеры, обеспечивающие дополнительный вклад в эмиссию и расширение спектра излучения. Этот эффект позволяет отказаться от применения вторичных флуоров, что снижает энергетические потери и повышает энергетическое разрешение. Измеренные значения относительного световыхода составили до 120 % от стандартного псевдокумольного раствора, что эквивалентно около 15 600 фотонов/МэВ для додекан-нафталиновых систем. Новизна работы заключается в экспериментальном подтверждении возможности создания высокоэффективных жидких сцинтилляторов с упрощённым составом и рекордной светоотдачей без использования вторичных смещающих добавок. Полученные результаты открывают перспективы применения таких систем в экспериментах по регистрации ионизирующего излучения, включая поиск безнейтринного двойного бета-распада.

Ключевые слова: безнейтринный двойной бета распад, неодим-150, жидкий сцинтиллятор, синтин, додекан, нафталин, световыход, флуоресцентные свойства, механизм переноса энергии, кварцевые фотоумножители.

Пшуков Адам Музарифович – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, директор центра новых детекторных технологий и регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кокоева Анета Ахмедовна – к.х.н., доцент кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Ермоленко Данил Николаевич – стажер-исследователь центра детекторных технологий регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Кашежев Алим Заурбекович - стажер-исследователь центра детекторных технологий регистрации нейтрино, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Original paper

**On the possibility of using naphthalene crystals in the production of liquid organic scintillators
for use in neutrino physics**

А.М. Pshukov, А.А. Kokoeva, D.N. Ermolenko, А.З. Kashezhev
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.148

Abstract: This study reports a comprehensive investigation of novel scintillation systems based on syntin and dodecane, incorporating naphthalene and 2,5-diphenyloxazole as primary additives. For the first time, it was demonstrated that optimizing the naphthalene concentration and achieving direct spectral matching with the sensitivity range of photodetectors can result in a light yield surpassing that of standard pseudocumene-based solutions. At a naphthalene concentration of 100 g/L, excimer formation was observed, contributing additional emission components and broadening the

fluorescence spectrum. This approach eliminates the need for secondary wavelength shifters, thereby reducing energy losses and improving energy resolution. The measured relative light yield reached up to 120% of the reference pseudocumene solution, corresponding to approximately 15,600 photons/MeV for dodecane–naphthalene mixtures. The novelty of this work lies in the experimental validation of the feasibility of developing highly efficient liquid scintillators with a simplified composition and record-high light output without secondary shifting additives. The results highlight the potential of these materials for applications in ionizing radiation detection, including neutrinoless double-beta decay experiments.

Keywords: neutrinoless double beta decay, neodymium-150, liquid scintillator, synthine, dodecane, naphthalene, light output, fluorescent properties, energy transfer mechanism, quartz photomultipliers.

Adam M. Pshukov – Ph. D., Senior Researcher, Director of the Center for New Detector Technologies and Neutrino Regulation, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov ORCID: 0000-0003-2849-1238

Aneta A. Kokoeva – Ph. D., Associate Professor, Department of Organic Chemistry and High Molecular Compounds, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov ORCID: 0000-0002-6583-8555

Danil N. Ermolenko – Research Intern, Center for Neutrino Detection Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Alim Z. Kashezhev – Research Intern, Center for Neutrino Detection Technologies, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov

Поступила в редакцию/received: 01.05.2025; после рецензирования/reviced: 30.05.2025; принята/accepted: 01.06.2025.

1. Введение

Жидкие сцинтилляторы представляют собой один из важных инструментов в современных экспериментах по астрофизике элементарных частиц, включая исследования в области физики нейтрино. Актуальность их использования обуславливается рядом факторов, касающихся как технических характеристик этих материалов, так и научных задач, стоящих перед современными физическими исследованиями. Они обеспечивают эффективное обнаружение и измерение частиц с низкой энергией благодаря высоким значениям сцинтилляции, хорошей светочувствительности, а также возможностям адаптации к различным размерам и формам детекторов.

К концу XX века интерес к нейтринной физике значительно возрос, и были разработаны несколько крупных международных проектов, использующих жидкие сцинтилляторы. Их использование было продемонстрировано работой [1], в таких экспериментах, как KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator Antineutrino Detector) [2] и Borexino [3], где центральную роль играют жидкостные сцинтилляционные детекторы, содержащие около 300 тонн псевдокумола (органического сцинтиллятора). Применение этих детекторов распространяется на реакторные эксперименты с антинейтрино, такие как Double Chooz [4], Daya Bay [5] и RENO [6]. В крупномасштабных экспериментах (таких как [7]) используются детекторы объёмом до 20 килотонн, а в рамках проекта LENA планируется развёртывание 50-килотонного жидкого сцинтиллятора

на руднике Пюхясалми (Финляндия) [8]. Активно развиваются и исследования стерильных нейтрино, включая эксперименты НЕЙТРИНО-4 [9] и NEOS [10].

Выбор материалов сцинтиллятора играет ключевую роль в увеличении световыхода, что является важнейшим показателем эффективности при обнаружении редких событий, таких как безнейтринный двойной бета-распад. Не менее значимы инженерные аспекты, включая подбор фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) с низким уровнем собственного радиоактивного фона и областью максимальной спектральной чувствительности, совпадающей со спектром излучения сцинтиллятора. Также необходимо улучшить прозрачность и обеспечить производство жидких сцинтилляторов с использованием более дешевого, доступного и пожаробезопасного сырья с высоким значением температуры вспышки. Учитывая вышеизложенное, в этом исследовании были выбраны додекан и синтин, причем, синтин является относительно новым компонентом, введенным в предыдущих исследованиях [11]. Полициклические ароматические соединения, такие как кристаллы нафталина, включены для увеличения световыхода. Недавние исследования показали, что нафталин эффективно усиливает люминесцентные свойства синтина [12].

Процесс сцинтилляции включает несколько ключевых этапов, каждый из которых влияет на итоговый световой выход:

- ионизация и возбуждение (ионизирующее излучение взаимодействует с синтином и додеканом, приводя к ионизации и возбуждению их молекул);

- передача энергии нафталину (возбужденные молекулы синтина и додекана передают свою энергию нафталину посредством безызлучательных процессов, таких как резонансный перенос энергии Фёрстера) [13];

- флуоресценция нафталина (возбужденная молекула нафталина (нафталин*) может релаксировать в основное состояние ($S_1 \rightarrow S_0$) с испусканием фотона; это излучение соответствует классической мономерной флуоресценции нафталина).

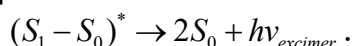
Наши исследования [14] показали, что оптимальные концентрации нафталина и 2,5-дифенилоксазол (ППО) для синтина составляют 100 г/л и 2,5 г/л соответственно. Такие концентрации обеспечивают баланс между эффективной передачей энергии и минимальным самопоглощением. В противном случае молекулы ППО могли бы повторно поглощать испускаемый свет [15-17].

При столь высоких концентрациях возбужденная молекула

нафталина (в S_1) может столкнуться с другой (в основном состоянии, S_0), образуя эксимер — короткоживущий возбужденный димер:



Эксимер отличается по электронной структуре от состояний одиночных молекул S_1 и S_0 . При возвращении в основное состояние эксимер испускает фотон с более длинной волной, чем мономерная флуоресценция, при этом отсутствует тонкая вибронная структура. Такое излучение шире по спектру и, как правило, смещено в видимую или ближнюю УФ-область [18]:



2. Характеристики материалов и приборов

Для измерения спектров возбуждения и излучения в работе использовался люминесцентный спектрофотометр PerkinElmer LS 55, управление которым осуществляется с персонального компьютера с помощью программы FL WinLab. Экспериментальная установка для измерения световых выходов представляла собой цилиндрическую кварцевую кювету со сцинтиллятором, размещенную на кварцевом окне ФЭУ. Установка была разработана для минимизации потерь света и максимального обнаружения сцинтилляционных фотонов. Использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-39А с сурьмяно-цезиевым фотокатодом на кварцевом стекле. Диаметр рабочей поверхности ФЭУ 34 мм. Область спектральной чувствительности 160-600 нм, область максимальной спектральной чувствительности 370-420 нм.

В работе использовались следующие материалы:

– нафталин кристаллический: производитель CHEMICAL LINE, очищенный (99%) был выбран из-за высокого квантового выхода люминесценции и способности использования в качестве основного флуорофора в сцинтилляторе;

– додекан: изготовитель ООО «Компонент-Реактив», продукт соответствует эталонным характеристикам согласно техническим условиям ТУ КОМП 3-518-12, плотность 0,75 г/л., инертный растворитель, прозрачный в УФ-видимом спектре;

– 2,5-дифенилоксазол (ППО) – сцинтилляционный материал квалификации (х.ч.) по МРТУ 6-09-6601 производства ООО «Реахим». Выполняет функцию преобразователя длины волны.

– синтин – искусственное топливо, получается обычно из угля методом Фишера-Тропша, выбран как основной растворитель из-за высокой температуры вспышки.

Сцинтилляционный раствор готовили, растворяя нафталин в додекане и синтине (при концентрации 100 г/л) и обеспечивая

гомогенность с помощью ультразвукового гомогенизатора. При измерении относительного световыхода ППО добавляли в оба полученных раствора, а также в псевдокумол, в контролируемых концентрациях 2,5 г/л.

3. Экспериментальное исследование спектральных характеристик и светового выхода

В ходе исследований были получены спектры возбуждения и излучения (рис. 1), подтверждающие работоспособность сцинтилляционной системы без применения дополнительных спектральных преобразователей, таких как 1,4-бис(2-(5-фенилоксазолил))-бензол), при использовании кварцевых ФЭУ.

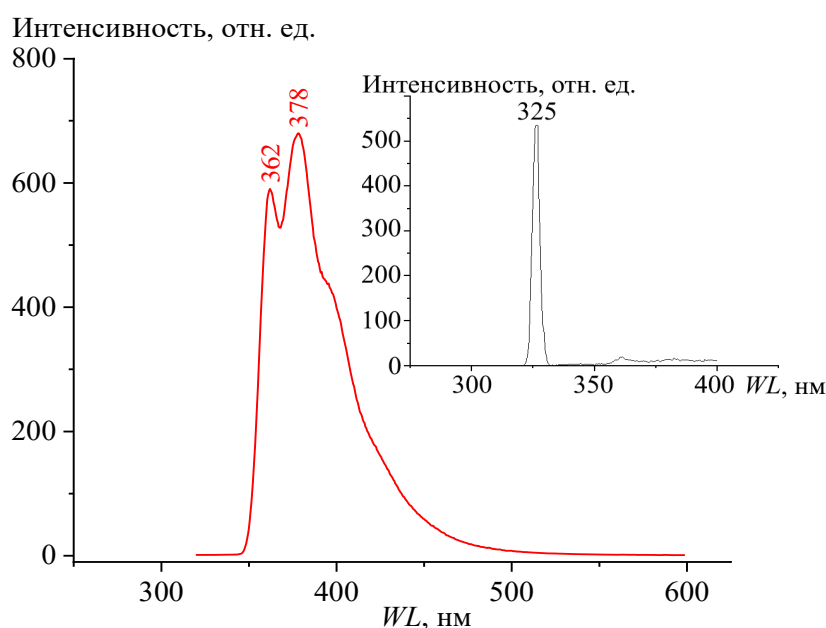


Рис. 1. Красная кривая показывает спектр после добавления ППО (2,5 г/л) с пиком возбуждения при 325 нм. Черная кривая - спектр возбуждения.

Наблюдаемая люминесценция представляет собой суперпозицию структурированного мономерного излучения и эксимерной флуоресценции с характерной широкой полосой в красной области спектра. Установлено, что спектральные максимумы излучения исследованных сцинтилляторов (на основе додекана, нафталина с ППО и синтина с аналогичными добавками) находятся в области 370-420 нм, что оптимально соответствует диапазону пиковой чувствительности используемых кварцевых ФЭУ).

Был выполнен трехмерный спектральный анализ с применением следующих режимов измерений: (1) сканирование по каналу возбуждения (excitation scan); (2) сканирование по каналу излучения (emission scan).

При любом из этих видов сканирования система автоматически повторяет измерения в заданном диапазоне, но после каждого цикла один из параметров (длина волны возбуждения или излучения) изменяется. Для

3D-эмиссионного сканирования каждый цикл измерений по излучению повторяется с новой длиной волны возбуждения. Это даёт возможность отобразить на одном графике зависимость как от длины волны возбуждения, так и от длины волны излучения. Построен подробный трёхмерный график в диапазоне от 300 до 500 нм, где по двум осям отложены длины волн возбуждения и излучения, а по оси Z – интенсивность излучения (рис. 2 и 3).

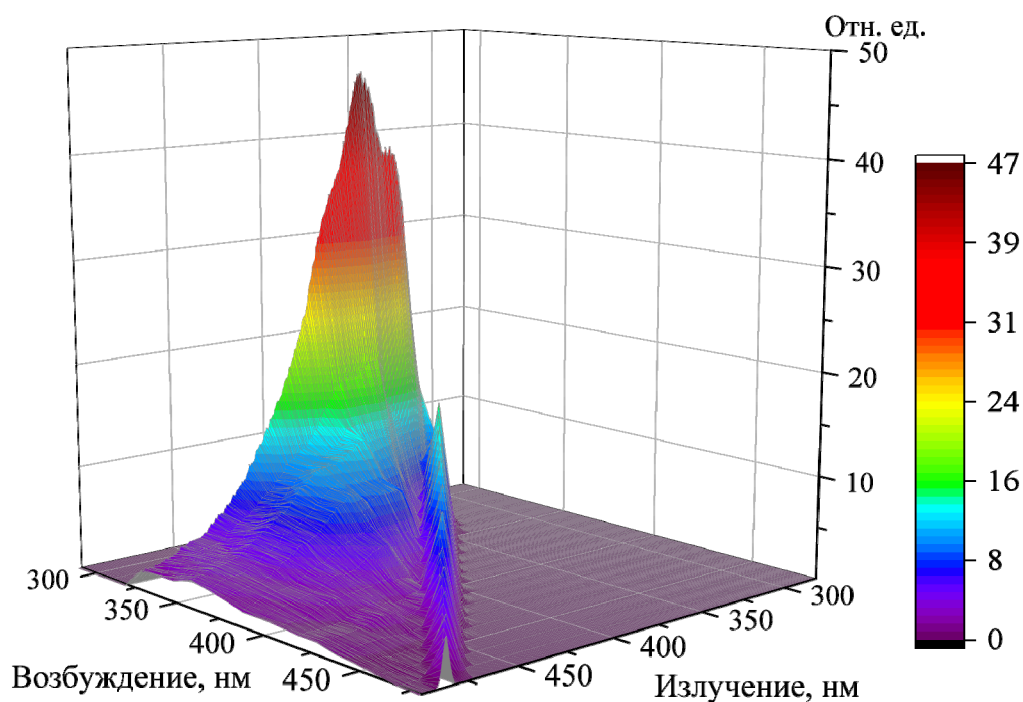


Рис. 2. 3D спектр излучения растворителя на основе додекана с добавлением 100 г/л нафталина.

Распределение интенсивности вдоль оси Z , полученное в ходе 3D-сканирования, показало, что при длине волны возбуждения около 332 нм достигается максимальное излучение вблизи 380 нм. Это свидетельствует об эффективной передаче энергии между молекулами в системе. Подобная разница между длинами волн подтверждает, что энергия, поглощённая при более короткой волне, эффективно переизлучается при более длинной волне, повышая интенсивность и качество регистрируемого сигнала.

Построение спектров возбуждения и излучения в режиме картирования (рис. 4 и 5) даёт целостное представление о том, как различные компоненты сцинтилляционной смеси (в частности, нафталин и ППО) взаимодействуют друг с другом и влияют на совокупное свечение.

1. Без добавки ППО (додекан + нафталин). Анализ 3D-спектров даёт возможность увидеть, при каких длинах волн возбуждения нафталин наиболее эффективно поглощает энергию и как это отражается на интенсивности излучения в районе 380 нм.

2. С добавкой ППО (додекан + нафталин + ППО). Вторая система, дополненная ППО, показывает, как наличие вторичного люминофора (ППО) сдвигает максимум излучения и/или изменяет интенсивность свечения. Здесь особенно важно отметить, что ППО может не только усиливать общую интенсивность за счёт эффективной передачи энергии от нафталина, но и «дооптимизировать» длину волны испускаемого света, делая её более соответствующей диапазону чувствительности ФЭУ.

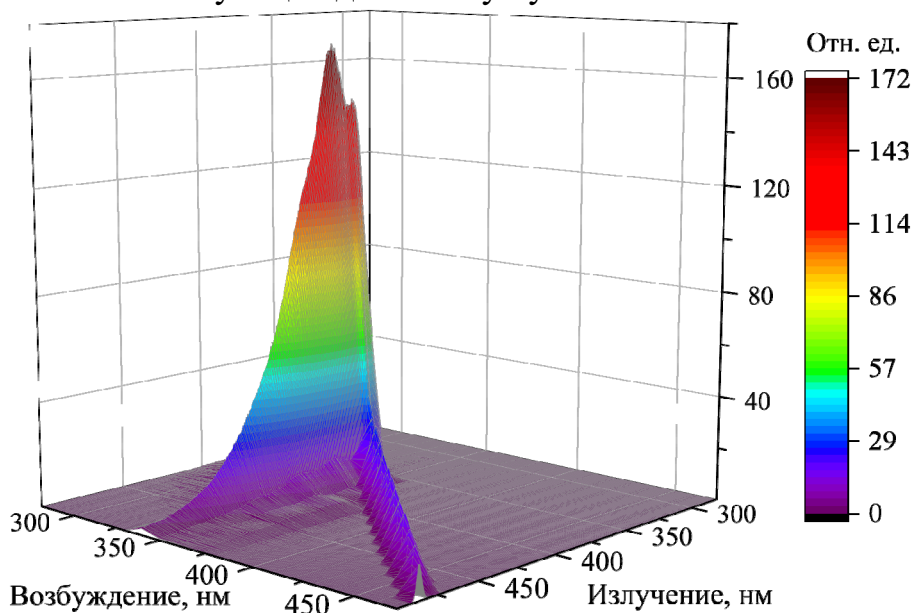


Рис. 3. 3D спектр излучения растворителя на основе додекана с добавлением 100 г/л нафталина и 2,5 г/л ППО.

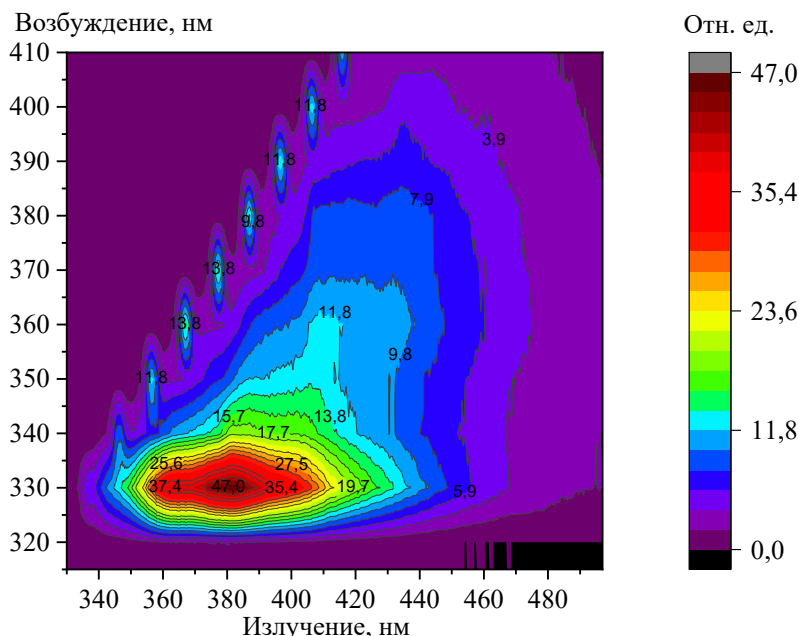


Рис. 4. Спектр излучения в режиме картирования растворителя додекана 100 г нафталина/литр додекана, для максимума длины волны 380 нм.

Детальный 3D-анализ позволяет лучше понять механизмы свечения,

вклад каждого вещества в формирование спектра и условия, при которых достигается наилучший световой выход.

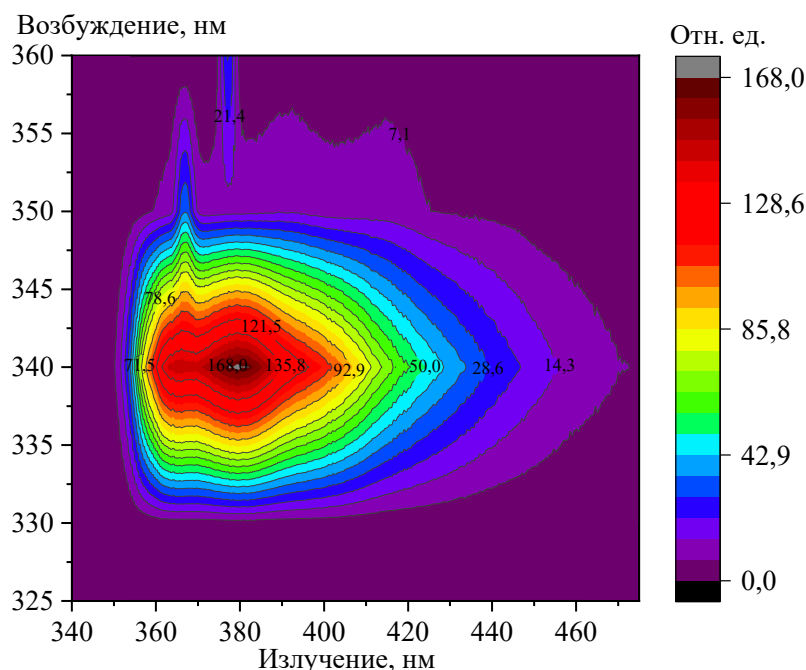


Рис. 5. Спектр излучения (в режиме картирования) растворителя на основе додекана с добавлением 100 г нафталина на литр и 2,5 г/л ППО, для максимума при длине волны 380 нм.

Измерения световых выходов проводились с использованием кварцевой кюветы, заполненной жидким сцинтиллятором, при наблюдении с помощью кварцевого ФЭУ-39А. Для возбуждения образца применялся источник ^{137}Cs (фотоны с энергией 661,6 кэВ). Экспериментальная установка для измерения светового выхода была размещена в темном помещении с температурой от 20°C до 25°C. Схема установки представлена на рис. 6.

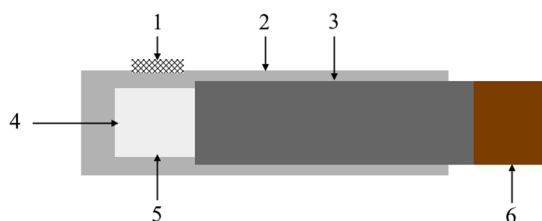


Рис. 6. Чертеж установки, используемой для измерения относительного световых выходов сцинтилляторов. 1 – источник гамма-квантов $\text{Cs}-137$; 2 – экранирующий кожух детектора; 3 – ФЭУ 39-А; 4 – отражатель из алюминиевой фольги; 5 – кювета для раствора; 6 – корпус делителя ФЭУ [19].

На кварцевое окно ФЭУ устанавливалась цилиндрическая кварцевая кювета с размерами 40×40 мм толщиной стенки 3 мм, содержащая сцинтиллятор. Кювета была окружена отражателем из алюминиевой

майларовой пленки, за исключением той стороны, которая примыкала к кварцевому окну и была оптически соединена с ФЭУ. Образец облучался радиоактивным источником, находящимся в закрытой коробке вместе с образцом и отражателем.

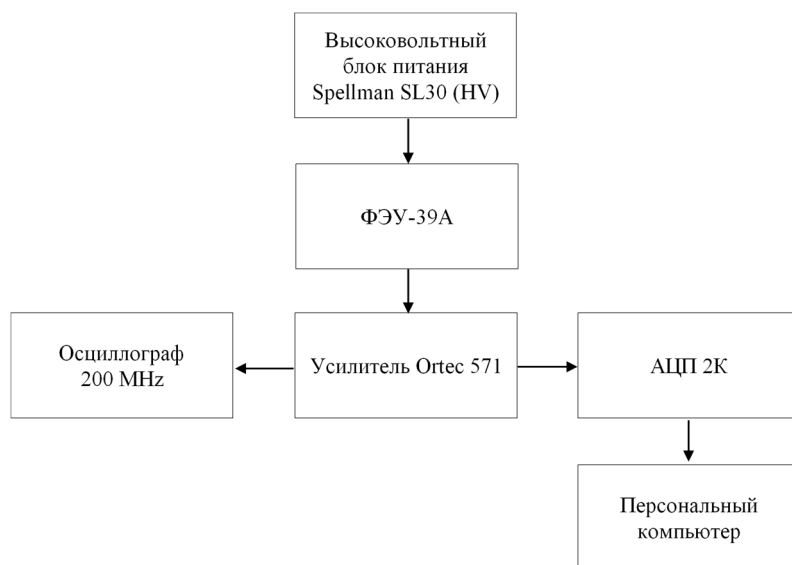


Рис. 7. Блок схема, используемая для измерения светоотдачи [19].

На рис. 7 приводится блок схема, используемая для измерения световых выходов сцинтилляторов. Источник высокого напряжения SL30 Spellman обеспечивал напряжение – 1088 В. на ФЭУ. Сигнал с ФЭУ подавался на вход спектрометрического усилителя модели 571 фирмы Ortec. С выхода усилителя сигнал, имеющий форму колокола и время формирования импульса 2 микросекунды, передавался на АЦП последовательного приближения типа Wilkinson с 2048 каналами. Сбор и обработка спектров осуществлялись с помощью программы SpectraLineGP, разработанной лабораторией спектрометрии и радиометрии (г. Зеленоград). Программа предназначена для проведения спектрометрических измерений и точной обработки гамма-спектров, включая калибровку и определение параметров пиков. Форму амплитуды импульса как с непосредственно с ФЭУ так и после спектрометрического усилителя смотрели с помощью цифрового осциллографа.

Перед облучением источником ^{137}Cs сцинтилляционные образцы продували азотом в течение 20 минут и фильтровали с помощью микрофильтра для обеспечения оптимальной генерации светового импульса. Измерения начинались примерно через 10 минут после подачи высокого напряжения (HV). Этот временной интервал поддерживался постоянным во всех измерениях, чтобы минимизировать потенциальные эффекты дрейфа HV или увеличения содержания кислорода в образце с течением времени. Определение относительного световых выходов

осуществляется путем регистрации характерного комптоновского спектра (зависимость числа событий от амплитуды сигнала ФЭУ) и определения амплитуды сигнала ФЭУ, соответствующего максимуму спектра в комптоновском плече. Затем амплитуда этого сигнала сравнивается с сигналом эталонного образца псевдокумола при той же энергии. Для сравнения значений между образцом и эталоном необходимо вычесть значение пьедестала.

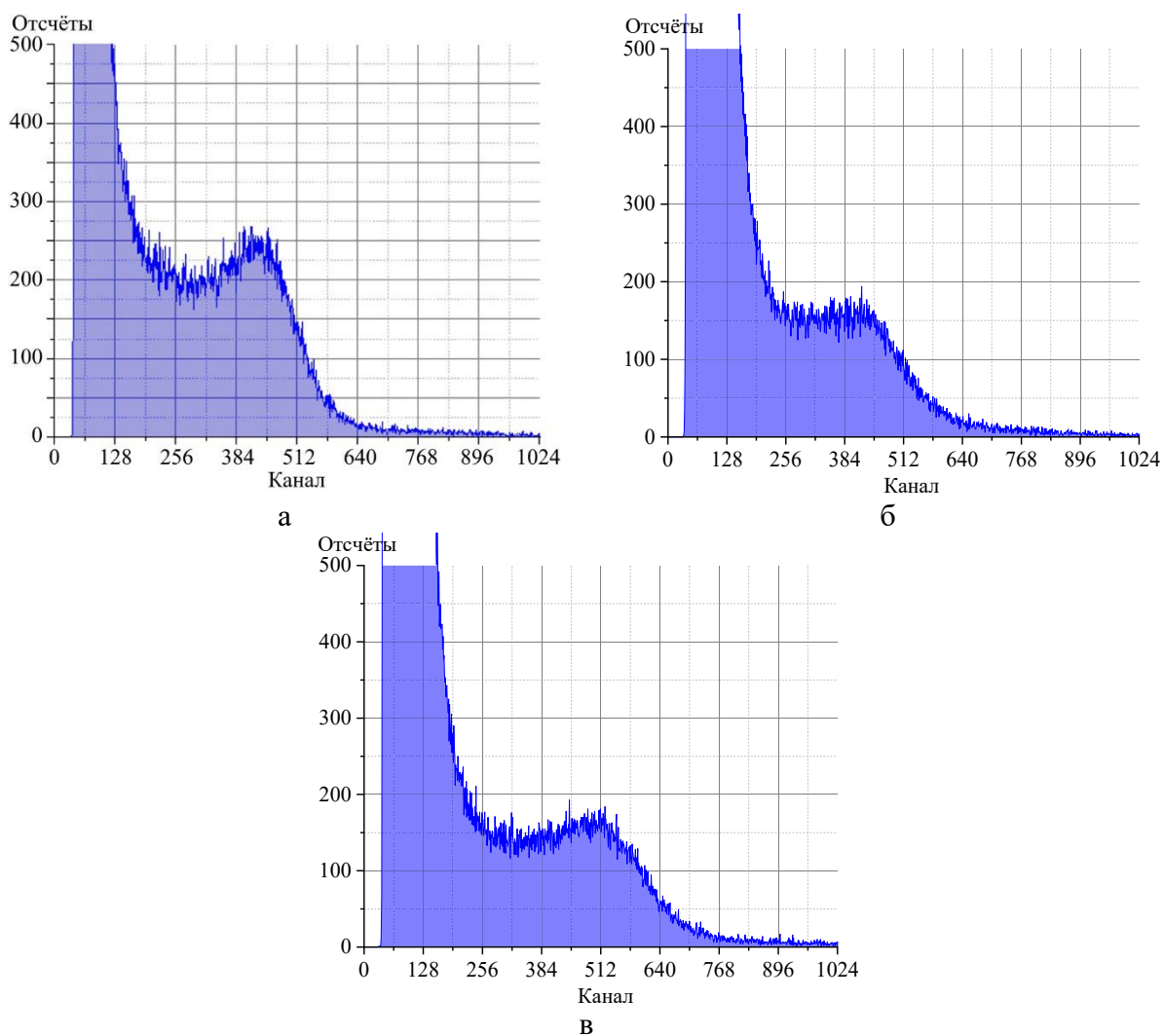


Рис. 8 Комптоновские спектры от источника ^{137}Cs : а – псевдокумол, б – синтин, в – додекан.

Измеренные комптоновские спектры с детекторов, псевдокумола и додекана при облучении источником ^{137}Cs представлены на рис. 8. В верхней части (см. рис. 8 а) показан комптоновский контур эталонного образца псевдокумола, а в нижней — комптоновский спектр образца, содержащего сцинтиллятор на основе додекана (см. рис. 8 б) и нафталина (см. рис. 8 в). Более высокая световая отдача сцинтиллятора соответствует смещению комптоновского края в сторону более высоких амплитуд

сигналов ФЭУ (по оси абсцисс на графике). Максимум комптоновского спектра на комптоновском крае и высокоэнергетическом хвосте аппроксимируется с помощью гауссовой аппроксимации. Относительный световыход сцинтиллятора на основе додекана с добавлением 100 г/л нафталина, представленный на рис. 8 в, составляет 120 % от значения для псевдокумола, а для синтина с нафталином (см. рис. 8 б) – 94 %. Значения получены в результате трехкратных измерений амплитудных спектров с каждым сцинтиллятором. Время измерения для точной оценки выбрано одинаковым и равным 30 минут. Измерения проведены в одной и той же кювете, при одинаковой геометрии и объеме жидкости.

4. Выводы

1. Впервые показано, что оптимизация концентрации нафталина и спектральное согласование излучения сцинтиллятора с диапазоном чувствительности фотоприемников позволяют достичь световыхода, существенно превышающего характеристики традиционных растворов на основе псевдокумола, без применения вторичных флуоров.

2. При концентрации нафталина 100 г/л зафиксировано образование эксимеров, формирующих широкополосное излучение с максимумом, смещённым в красную область спектра. Это явление способствует увеличению интегральной интенсивности люминесценции.

3. Установлено, что растворитель (додекан) создаёт неполярную среду, способствующую эффективной передаче энергии и минимизации потерь при конверсии фотонов, что ранее не реализовывалось в жидких органических сцинтилляторах подобного состава.

4. Достигнут рекордный относительный световой выход: для додекан-нафталинового состава — порядка 120 % от эталонного раствора псевдокумола, что эквивалентно $\sim 15\,600$ фотонов/МэВ. Это значение существенно превышает показатели, известные для систем без вторичных смещающих добавок.

5. Реализованная методология упрощения состава сцинтиллятора без потерь эффективности открывает новые перспективы применения таких систем в задачах регистрации ионизирующего излучения и экспериментах по поиску безнейтринного двойного бета-распада.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-12-00322).

Библиографический список:

1. **Cowan, C.L.** Detection of the free neutrino: A Confirmation / C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Kruse, A.D. McGuire // Science. – 1956. – V. 124. – I. 3212. – P. 103-104. DOI: 10.1126/science.124.3212.10.
2. **Suzuki, A.** Results from KamLAND reactor neutrino detection / A. Suzuki, KamLAND Collaboration //

- Physica Scripta. – 2005. – V. 2005. – №. T121. – P. 33-38. DOI: 10.1088/0031-8949/2005/T121/004.
3. **Alimonti, G.** The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso / G. Alimonti, C. Arpesella, H. Back et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2009. – V. 600. – I. 3. – P. 568-593. DOI: 10.1016/j.nima.2008.11.076.
 4. **Abe, Y.** Indication of reactor electron antineutrinos disappearance in the Double Chooz Experiment / Y. Abe, C. Aberle, T. Akiri et al. // Physical Review Letters. – 2012. – V. 108. – I. 13. – P. 131801-1-131801-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801.
 5. **An, F.P.** Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay / F.P. An, J.Z. Bai, A.B. Balantekin // Physical Review Letters. – 2012. – V. 108. – I. 17. – P. 171803-1-171803-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.171803.
 6. **Ahn, J.K.** Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment / J.K. Ahn, S. Chebotaryov, J.H. Choi et al. // Physical Review Letters. – 2012. – V. 108. – I. 19. – P. 191802-1-191802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.191802.
 7. **An, F.** Neutrino physics with JUNO / F. An, G. An, Q. An et al. // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics. – 2016. – V. 43. – № 3. – Art. № 030401. – 188 p. DOI: 10.1088/0954-3899/43/3/030401.
 8. **Wurm, M.** The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA / M. Wurm, J.F. Beacom, L.B. Bezrukov et al. // Astroparticle Physics. – 2012. – V. 35. – I. 11. – P. 685-732. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.02.011.
 9. **Serebrov, A.P.** The first observation of the oscillation effect in the neutrino-4 experiment on the search for the sterile neutrino (continuation) / A.P. Serebrov, R.M. Samoilov, V.G. Ivochkin et al. // JETP Letters. – 2019. – V. 109. – I. 4. – P. 213-221. DOI: 10.1134/S0021364019040040.
 10. **Ko, Y.J.** Sterile neutrino search at the NEOS experiment / Y.J. Ko, B.R. Kim, J.Y. Kim et al. // Physical Review Letters. – 2017. – V. 118. – I.12. – P. 121802-1-121802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.121802.
 11. **Пшуков, А.М.** Жидкий сцинтиллятор на основе синтина / А.М. Пшуков, Ш.И. Умеров // Препринт ИЯИ РАН 1442/2019. – М.: Институт ядерных исследований Российской академии наук, 2019. – 14 с.
 12. **Пшуков, А.М.** Исследование оптических свойств жидкого органического сцинтиллятора на основе синтина и нафталина для использования в нейтринной физике / А.М. Пшуков, А.А. Кокоева // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2023. – Т. 13. – № 3. – С. 39-44.
 13. **Elisei F.** Measurements of liquid scintillator properties for the Borexino detector / F. Elisei, F. Gatti, A. Goretti et al. // Physics. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. – 1997. – V. 400. – I. 1. –P. 53-68. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00933-9.
 14. **Вересникова, А.В.** Исследование спектральных и люминесцентных характеристик сцинтиллятора на основе синтина / А.В. Вересникова, З.Ю. Исупова, З.Х. Калажиков и др. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2022. –Т. 12. – № 4. – С. 69-77.
 15. **Серебров, А.П.** Создание второй нейтринной лаборатории на реакторе СМ-3 с целью увеличения точности эксперимента «Нейтрино-4» / А.П. Серебров, В.Г. Ивочкин, Р.М. Самойлов и др. // Журнал технической физики. –2023. – Т. 93. – Вып. 1. – С. 175-186. DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54079.241-22.
 16. **Birks, J.B.** The theory and practice of scintillation counting / J.B. Birks. – Oxford, London: Pergamon Press, 1964. – xx + 662 p. DOI: 10.1016/C2013-0-01791-4.
 17. **Buck, W.L.** The origin of scintillations in organic Materials / W.L. Buck // IRE Transactions on Nuclear Science. – 1960. – V. 7. – I. 2/3. – P. 11-16. DOI: 10.1109/TNS2.1960.4315727.
 18. **Birks, J.B.** The influence of excimer formation on solvent-solute energy transfer in organic liquid scintillators / J.B. Birks, J. Conte, G. Walker // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1966. – V. 13. – I. 3. – P. 148-152. DOI: 10.1109/TNS.1966.4324092.
 19. **Пшуков, А.М.** Исследование люминесцентных и спектрометрических свойств гибридных жидких органических сцинтилляторов с добавкой нафталиновых кристаллов для использования в нейтринной физике / А.М. Пшуков, А.А. Кокоева, А.З. Кашежев, Д.Н. Ермоленко // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2024. – Т. 14. – № 3. – С. 30-37.

References:

1. Cowan C.L., Reines F., Harrison F.B., Kruse H.W., McGuire A.D. Detection of the free neutrino: A Confirmation, *Science*, 1956, vol. 124, issue 3212, pp. 103-104 DOI: 10.1126/science.124.3212.10.
2. Suzuki A., KamLAND Collaboration Results from KamLAND reactor neutrino detection, *Physica Scripta*, 2005, vol. 2005, no. T121, pp. 33-38. DOI: 10.1088/0031-8949/2005/T121/004.
3. Alimonti G., Arpesella C., Back H. et al. The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and*

- Associated Equipment*, 2009, vol. 600, issue 3, pp. 568-593. DOI: 10.1016/j.nima.2008.11.076.
4. Abe Y., Aberle C., Akiri T. et al. Indication of reactor electron antineutrinos disappearance in the Double Chooz Experiment, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 13, pp. 131801-1-131801-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801.
5. An F.P., Bai J.Z., Balantekin A.B. et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 17, pp. 171803-1-171803-7. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.171803.
6. Ahn J.K., Chebotaryov S., Choi J.H. et al. Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment, *Physical Review Letters*, 2012, vol. 108, issue 19, p. 191802-1-191802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.191802.
7. An F., An G., An Q. et al. Neutrino physics with JUNO // *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2016, vol. 43, no. 3, art. no. 030401, 188 p. DOI: 10.1088/0954-3899/43/3/030401.
8. Wurm M., Beacom J.F., Bezrukov L.B. et al. The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA, *Astroparticle Physics*, 2012, vol. 35, issue 11, pp. 685-732. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2012.02.011.
9. Serebrov A.P., Samoïlov R.M., Ivochkin V.G. et al. The first observation of the oscillation effect in the neutrino-4 experiment on the search for the sterile neutrino (continuation), *JETP Letters*, 2019, vol. 109, issue 4, pp. 213-221. DOI: 10.1134/S0021364019040040.
10. Ko Y.J., Kim B.R., Kim J.Y. Sterile neutrino search at the NEOS experiment, *Physical Review Letters*, 2017, vol. 118, issue 12, pp. 121802-1-121802-6. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.121802.
11. Pshukov A.M., Umerov Sh.I. *Zhidkij stsimillyator na osnove sintina* [Liquid scintillator based on syntin], Preprint of INR RAS 1442/2019. Moscow, Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019. 14 p. (In Russian).
12. Pshukov A.M., Kokoeva A.A. Issledovanie opticheskikh svoystv zhidkogo organicheskogo stsimillyatora na osnove sintina i naftalina dlya ispol'zovaniya v nejtrinoj fizike [Investigation of optical properties of a liquid organic scintillator based on syntin and naphthalene for use in neutrino physics], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University], 2023, vol. 13, no. 3, pp. 39-44. (In Russian).
13. Elisei F., Gatti F., Goretti A. et al. Measurements of liquid scintillator properties for the Borexino detector, *Physics. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 1997, vol. 400, issue 1, pp. 53-68. DOI: 10.1016/S0168-9002(97)00933-9.
14. Veresnikova A.V., Isupova Z.Yu., Kalazhokov Z.Kh. et al. Issledovanie spektral'nykh i lyuminescentnykh kharakteristik stsimillyatora na osnove sintina [Investigation of spectral and luminescent characteristics of a scintillator based on syntin], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 69-77. (In Russian).
15. Serebrov A. P.1, Ivochkin V. G.1, Samoïlov R. M. et al. Creation of the second neutrino laboratory at the SM-3 reactor in order to increase the accuracy of the «Neutrino-4» experiment, *Technical Physics*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 166-176. DOI: 10.21883/TP.2023.01.55452.241-22.
16. Birks J.B. *The theory and practice of scintillation counting*. Oxford, London, Pergamon Press, 1964, xx + 662 p. DOI: 10.1016/C2013-0-01791-4.
17. Buck W.L. The origin of scintillations in organic materials, *IRE Transactions on Nuclear Science*, 1960, vol. 7, issue 2/3, pp 11-16. DOI: 10.1109/TNS2.1960.4315727.
18. Birks J.B., Conte J., Walker G. The influence of excimer formation on solvent-solute energy transfer in organic liquid scintillators, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1966, vol. 13, issue 3, pp. 148-152. DOI: 10.1109/TNS.1966.4324092.
19. Pshukov A.M., Kokoeva A.A., Kashezhev A.Z., Ermolenko D.N. Issledovanie lyuminescentnykh i spektrometricheskikh svoystv gibridnykh zhidkikh organicheskikh stsimillyatorov s dobavkoj naftalinovykh kristallov dlya ispol'zovaniya v nejtrinoj fizike [Study of luminescent and spectrometric properties of hybrid liquid organic scintillators with naphthalene crystals for use in neutrino physics], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University], 2024, vol. 14, no. 3, pp. 30-37. (In Russian).