

НОВЫЕ БАЗОВЫЕ РАСТВОРИТЕЛИ ДЛЯ ЖИДКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ. СОЗДАНИЕ Nd-СОДЕРЖАЩИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СМЕСИ СИНТИНА И ПСЕВДОКУМОЛА

© 2023 г. И. Р. Барабанов^{1),2)}, А. В. Вересникова^{1),2)}, А. А. Моисеева³⁾, В. П. Моргалюк³⁾, Г. Я. Новикова^{1),2)*}, Е. А. Янович^{1),2)}

Поступила в редакцию 26.11.2022 г.; после доработки 26.11.2022 г.; принята к публикации 29.11.2022 г.

Рассматриваются новые базовые растворители синтин и ракетное топливо Т-6 для создания жидких органических сцинтилляторов. Измерена длина ослабления света этих растворителей (как полученных от производителя, так и после хроматографической очистки на Al_2O_3), а также относительный световыход сцинтилляторов, созданных на их основе. Методом хроматомасс-спектрометрии и УФ-спектрофотометрии определен химический состав синтина. На основе смеси синтина и псевдокумола создан Nd-содержащий сцинтиллятор (C_{Nd} 9 г/л) и измерен его световыход (LY 60%) по отношению к сцинтиллятору на основе линейного алкилбензола (ЛАБ).

DOI: 10.31857/S0044002723020034, EDN: RIFFIF

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для многих нейтринных экспериментов используются и разрабатываются новые жидкие органические сцинтилляторы (LS) [1–4], в том числе и элемент-содержащие [5–20].

Углеводородные растворители, составляющие основу любого LS, вместе с растворенными сцинтилляционными добавками являются активной детектирующей средой для нейтринных взаимодействий. Элементы, дополнительно вводимые в LS в виде тех или иных растворимых в нем соединений, расширяют возможности используемых LS.

Так, например, введение гадолиния в LS приводит к значительному увеличению эффективности регистрации антинейтрино за счет подавления фона благодаря высокому сечению захвата нейтронов на изотопах ^{157}Gd , ^{155}Gd . Измерение осцилляционных параметров с помощью реакторных антинейтрино в экспериментах Double Chooz [5], Daya Bay [6], RENO [7] показали надежность и эффективность Gd-содержащих жидких сцинтилляционных детекторов. Для поиска “стерильных” нейтрино в экспериментах NEOS [8], STEREO [9], Neutrino-4 [10] также используются Gd-LS. В

проекте iDream [11] разработан Gd-LS детектор для мониторинга антинейтринного реакторного излучения на АЭС.

Элемент-содержащие LS хорошо подходят также для поиска очень редких событий, таких как безнейтринный двойной бета-распад. В этом случае LS содержит в своем составе изотоп исследуемого элемента и в то же время является детектором для регистрации распада ядра. В эксперименте KamLANDZen [12] в сцинтилляторе непосредственно растворяется ^{136}Xe (обогащение 91%). В эксперименте SNO+ [1, 13] в сцинтиллятор вводится ^{136}Te (в составе натурального теллура, в котором его 34%). Введение в сцинтиллятор ^{96}Zr исследовалось в работах [14, 15]. Также многие работы были посвящены созданию Nd-содержащих LS [16–20], нацеленных на поиск распадов изотопа ^{150}Nd .

Для элемент-содержащих жидких органических сцинтилляторов, предназначенных для регистрации очень редких событий, особенно важен низкий уровень внутренней радиоактивности самого сцинтиллятора, пути достижения которого рассматриваются в работе [21], а также стабильность характеристик в течение длительного периода времени [22].

Стабильность характеристик сцинтиллятора во многом определяется выбором растворителя и влиянием на него растворенных соединений. В работе [22] показано, что карбоксилаты и β -дикетонаты

¹⁾Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия.

²⁾Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия.

³⁾Институт элементоорганических соединений РАН им. А.Н. Несмеянова, Москва, Россия.

*E-mail: g-novikova@mail.ru

Таблица 1. Температурный режим анализа

Температура термостата колонок (начальная), °С	50.0
Температура узла ввода пробы, °С	250.0
Температура ионного источника, °С	200.0
Температура блока соединения ГХ и МС, °С	250.0
Скорость подъема температуры, °С	30.0
Температура термостата колонок (конечная), °С	290.0
Время выдержки, мин	5.00

гадолиния, которые используются для создания Gd-содержащих LS, могут являться катализаторами окисления алкилбензолов. Поэтому, если для создания сцинтилляторов с точки зрения высокого световыхода наилучшими растворителями являются алкилбензолы (ЛАБ, РС, РХЕ), то с точки зрения стабильности, вероятно, лучше в качестве основного растворителя использовать предельные углеводороды, которые практически не подвержены процессам окисления и, как правило, имеют высокую прозрачность. Для повышения световыхода в предельные углеводороды можно добавлять ароматические, как это было сделано, например, в эксперименте Double Chooz, где в качестве основного растворителя использовалась смесь, состоящая из 80% додекана и 20% РХЕ. Стабильность в этом эксперименте была выше, чем в аналогичных экспериментах Daya Bay [6], RENO [7], где в качестве растворителя использовался только ЛАБ.

Но в отличие от ЛАБа додекан растворитель дорогой, что затрудняет его применение в крупномасштабных экспериментах, поэтому следует рассмотреть другие растворители, также состоящие из предельных углеводородов и производимые в промышленных масштабах.

В работе [23] в качестве нового растворителя для LS предложен синтин, который в настоящее время широко используется в качестве карбюратора для газовой цементации стали. Важными преимуществами синтина являются высокая температура вспышки (100°С), высокая прозрачность, а также возможность получения синтина с более низким содержанием углерода ¹⁴С (последнее будет зависеть от сырья, из которого синтезируют синтин).

Ранее на БНО ИЯИ РАН в качестве высокопрозрачного растворителя для создания сцинтилляторов большого объема был предложен растворитель “ракетное топливо Т-6”, который является

керосиновой фракцией нефти и, очевидно, состоит из предельных углеводородов.

Настоящая работа посвящена исследованию свойств новых растворителей синтина (“компонент-реактив”) и ракетного топлива Т-6 (ООО “ЛЛК-Интернешнл” (Лукойл)), а также исследованию характеристик сцинтилляторов, созданных на их основе.

Кроме того, исследуется возможность использования синтина в смеси с псевдокумолем (РС) для создания Nd-содержащего жидкого органического сцинтиллятора.

2. ХРОМАТОМАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Нами было проведено исследование состава синтина (“компонент-реактив”) с использованием газового хроматомакс-спектрометра Shimadzu GCMS-QP2020 (Япония). Измерения были выполнены в Центре исследования строения молекул ИНЭОС РАН, Москва.

Хроматографическое разделение осуществлялось на капиллярной колонке SH-Rtx-5MS (диаметр 0.25 мм, длина 30 м, толщина фазы 0.25 мкм) с поперечно-сшитыми дифенил- (5%) и диметил- (95%) полисилоксанами. Диапазон определяемых масс — от m/z 50 до m/z 650, значение скорости сканирования составило 3333 а.е.м./с, метод ионизации — электронный удар, газ-носитель — гелий, детектор — электронный умножитель с конверсионным динодом; ввод проб осуществлялся с делением потока, использовался запрограммированный температурный режим согласно табл. 1, общий поток составлял 17 мл/мин.

Газовая хроматомакс-спектрометрия позволила установить состав синтина: его основу составляют шесть индивидуальных линейных углеводородов (хроматограмма приведена на рис. 1), отличающихся только длиной цепи и содержанием в смеси ($\omega\%$) (табл. 2).

В табл. 2 величина $\omega\%$ была посчитана в результате интегрирования пиков по полному ионному току (метод сглаживания — билатеральный), и, фактически, она равняется отношению площади пика к их сумме; SI — индекс селективности (величина, определяющая, насколько масс-спектр, полученный экспериментально, совпадает с библиотечными данными, встроенными в программное обеспечение данного прибора — библиотека данных NIST17.lib); CAS — уникальный численный идентификатор химических соединений, внесенных в реестр Chemical Abstracts Service (для удобства поиска вещества).

Таблица 2. Результаты анализа

№ пика	Время удерживания, мин	$\omega\%$	SI, %	CAS	Вещество
1	5.832	0.29	98	629-50-5	Тридекан $C_{13}H_{28}$
2	6.309	35.00	96	629-59-4	Тетрадекан $C_{14}H_{30}$
3	6.743	30.02	97	629-62-9	Пентадекан $C_{15}H_{32}$
4	7.152	23.18	98	544-76-3	Гексадекан $C_{16}H_{34}$
5	7.537	11.46	98	629-78-7	Гептадекан $C_{17}H_{36}$
6	7.903	0.05	96	593-45-3	Октадекан $C_{18}H_{38}$

Проведенное хроматомасс-спектрометрическое исследование позволило также выявить и некоторое количество примесных соединений. Хотя их относительное содержание ничтожно мало в сравнении с основными компонентами смеси и составляет менее 0.01%, а сами пики веществ выходят наравне с базовой линией прибора и совсем немного отличаются от “шума” (рис. 1), упомянуть о них необходимо вследствие их возможного влияния на физико-химические характеристики получаемого из синтина жидкого сцинтиллятора (примеси могут уменьшать световыход, снижать прозрачность растворителя и уменьшать стабильность смеси из-за возможных химических реакций, протекающих в массе растворителя и потенциально позволяющих быстрее подвергаться деградации основным компонентам синтина).

По-видимому, основными примесями являются следующие пять соединений, представленные в табл. 3 (точность определения в данных случаях сильно снижена, в сравнении с определением основных компонентов синтина, индекс селективности варьируется от 82 до 93%).

Таким образом, с помощью газовой хроматомасс-спектрометрии нами был установлен химический состав синтина и определено содержание компонентов смеси в %. Синтин представляет собой смесь алканов линейного строения C_{13} – C_{18} , которые элюируются через примерно одинаковые

Таблица 3. Примеси в синтине

№ примеси	SI, %	Вещество	Брутто-формула
1	92	2,6,10-триметилдодекан	$C_{15}H_{32}$
2	86	10-метилнонадекан	$C_{20}H_{42}$
3	82	7-гексадеканаль	$C_{16}H_{30}O$
4	93	2-метилтетракозан	$C_{25}H_{52}$
5	88	Тетратетрактан	$C_{44}H_{90}$

промежутки времени в порядке увеличения числа атомов углерода в их молекулах. Основу смеси составляют углеводороды C_{14} – C_{16} , суммарное процентное содержание которых составляет более 88%. В смеси присутствуют также следовые количества примесей, способных непосредственно влиять на работу жидкого органического сцинтиллятора; показаны их предполагаемые формулы.

Используя данные табл. 2 (молярные массы найденных соединений и их процентное содержание), можно легко подсчитать среднюю молярную массу синтина (213.9 г/моль), а также общее количество атомов водорода в его составе, $N_H = 6.72 \times 10^{22}$ атомов/мл.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ НА СПЕКТРОФОТОМЕТРЕ

Для оценки прозрачности растворителей, предназначенных для создания LS, в лабораторной практике используется длина ослабления света (L) (расстояние, на котором интенсивность света уменьшается в e раз), которая рассчитывается при длинах волн в области, наиболее чувствительной для ФЭУ (обычно принято считать L для длин волн: 440, 430, 420 нм).

В нашей работе исследования проводились на двухлучевом спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 35 с использованием кварцевых кювет длиной 10 см, при этом пустая кювета служила эталоном. Длина ослабления света (L) рассчитывалась по формуле:

$$L_{420} = 10/2.3(A_{420} - A_{\min}),$$

где L_{420} — длина ослабления света при 420 нм, d — длина прохождения света ($d = 10$ см), A_{420} — поглощение света при 420 нм, A_{\min} — минимальное поглощение света.

Было исследовано также влияние сорбционной очистки с использованием Al_2O_3 (Aluminium Oxide

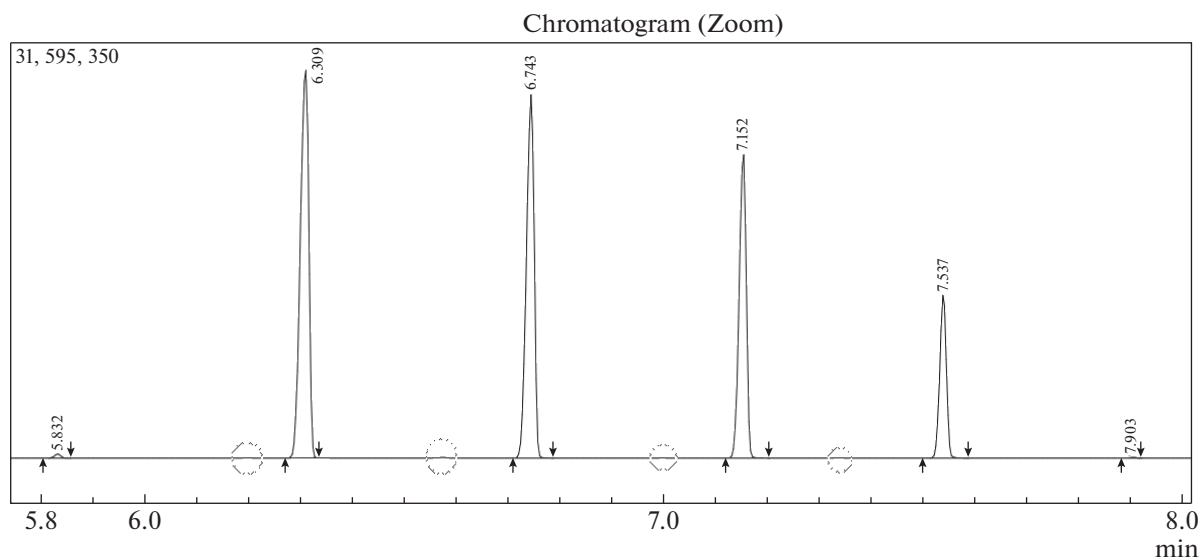


Рис. 1. Хроматограмма синтина (кружками обведены небольшие пики примесных соединений).

for Chromatography, ТУ 6-09-3916) на прозрачность растворителей.

Для хроматографической очистки использовались стеклянные колонки диаметром 3 см, с высотой слоя сорбента 12 см. Растворители через слой Al_2O_3 пропускались порциями, равными объему сорбента, помещенному в колонку. В случае первой порции часть растворителя остается на сорбенте и его объем значительно уменьшается.

В табл. 4 приводятся значения поглощения (A) и длины ослабления света (L) синтина и ракетного топлива Т-6 (как исходных, так и очищенных на Al_2O_3).

Из табл. 4 видно, что длины ослабления света у неочищенного синтина (“компонент-реактив”) и ракетного топлива Т-6 (Лукойл) при интересующих нас длинах волн (440, 430, 420 нм) одинаковы и равны 4.3 м при 440 нм, 3.3 м при 430 нм. (Несмотря на то, что исследуемый образец синтина был измерен спустя две недели после его производства, а Т-6 хранился много лет.)

После очистки на Al_2O_3 (при соотношении объемов растворителей и сорбента, равном 1 : 1) прозрачность обоих растворителей стала больше 20 м при всех интересующих нас длинах волн: 440, 430 и 420 нм.

На рис. 2 приводятся UV/VIS-спектры поглощения синтина, очищенного на оксиде алюминия (первая и вторая порции), и исходного синтина (“компонент-реактив”), а также ракетного топлива Т-6 (Лукойл), очищенного на оксиде алюминия (первая порция) и исходного. Спектры образцов приведены для 10 см кювет, измеренных по отношению к пустым кюветам.

Из рис. 2 видно, что максимумы поглощения в спектрах синтина смещены влево относительно максимумов в спектрах топлива Т-6. Однако синтин имеет также широкую полосу поглощения в области 200–280 нм, тогда как основными его компонентами, как было найдено с помощью хроматомасс-спектрометрического анализа, являются предельные углеводороды, полосы поглощения которых находятся в дальней ультрафиолетовой области при длинах волн < 200 нм [24, с. 99]. Чтобы понять, какие примеси в синтине дают полосу поглощения в области 200–280 нм, был проведен дополнительный спектрофотометрический анализ синтина.

4. УФ-СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНТИНА

УФ-спектрофотометрический анализ синтина показал, что в синтине в качестве примесей содержится также небольшое количество бензола или его производных.

На рис. 3 представлены UV/VIS-спектры поглощения синтина в гексане, зарегистрированные в 1 см кюветах по отношению к чистому гексану (для спектроскопии, СТП ТУ СОМР 2-010-06) при разных объемных долях синтина в гексане от 0.2 до 1.

Из UV/VIS-спектров поглощения синтина (рис. 3) видно, что в нем присутствуют примеси производных бензола, так как известно [24, с. 139], что в спектре поглощения бензола наблюдаются три полосы поглощения, две из которых, имеющие высокую интенсивность, лежат в дальнем ультрафиолете (180 и 203 нм), а одна слабая полоса с ярко выраженной тонкой структурой

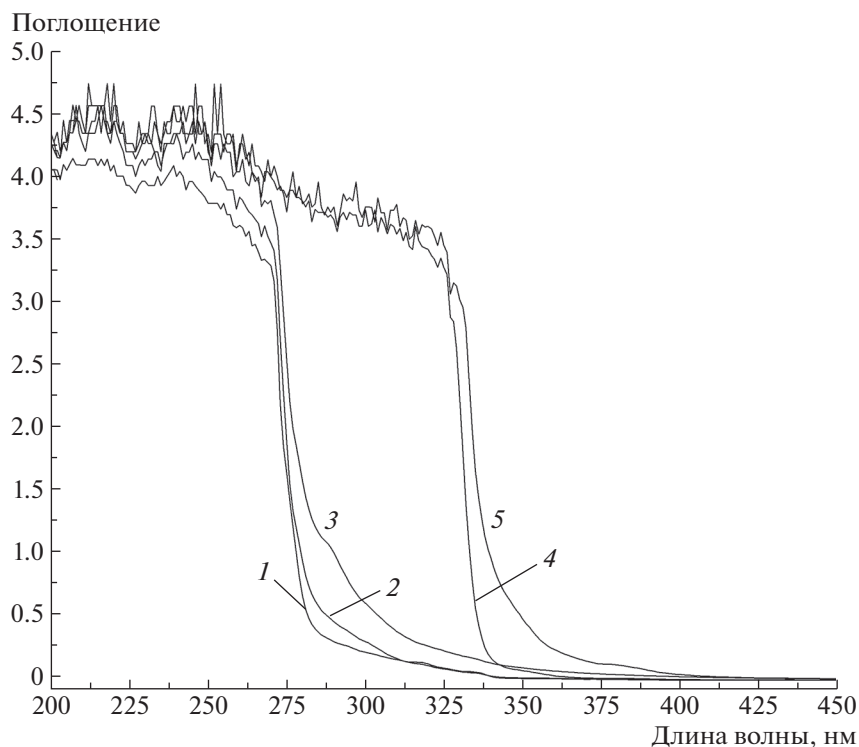


Рис. 2. UV/VIS-спектры поглощения синтина и ракетного топлива Т-6: 1 — синтин после очистки на Al_2O_3 (первая порция), 2 — синтин после очистки на Al_2O_3 (первая порция), 3 — синтин исходный, 4 — ракетное топливо Т-6 после очистки на Al_2O_3 (1 порция), 5 — ракетное топливо Т-6 до очистки.

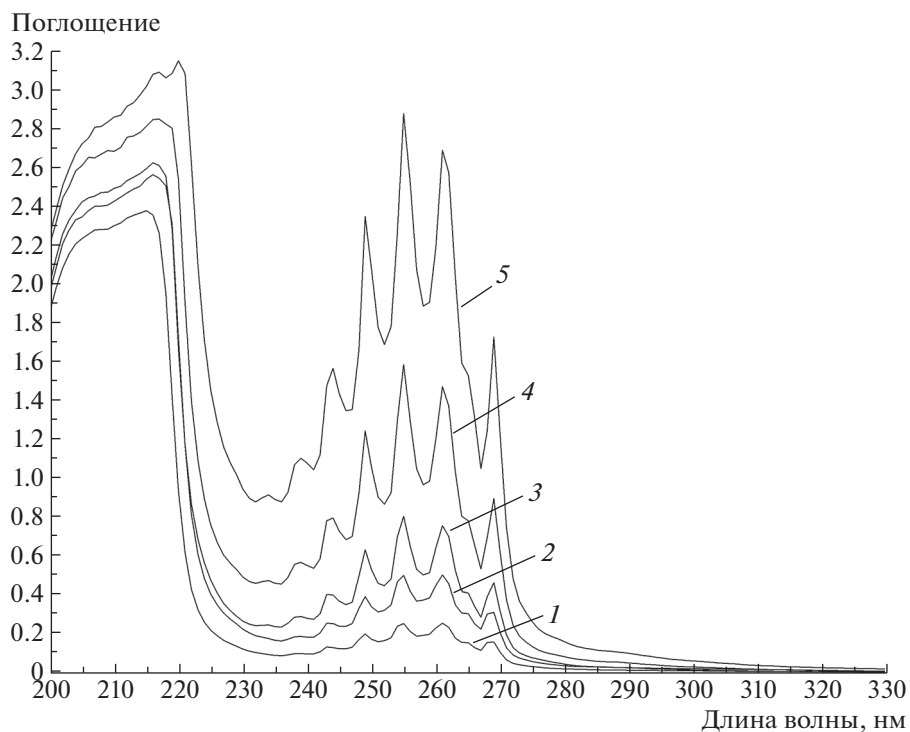


Рис. 3. UV/VIS-спектры поглощения синтина в гексане при разных объемных долях синтина ($R = V_{\text{синтина}}/V_{\text{общий}}$): 1 — $R = 0.20$, 2 — $R = 0.25$, 3 — $R = 0.33$, 4 — $R = 0.50$, 5 — $R = 1.0$.

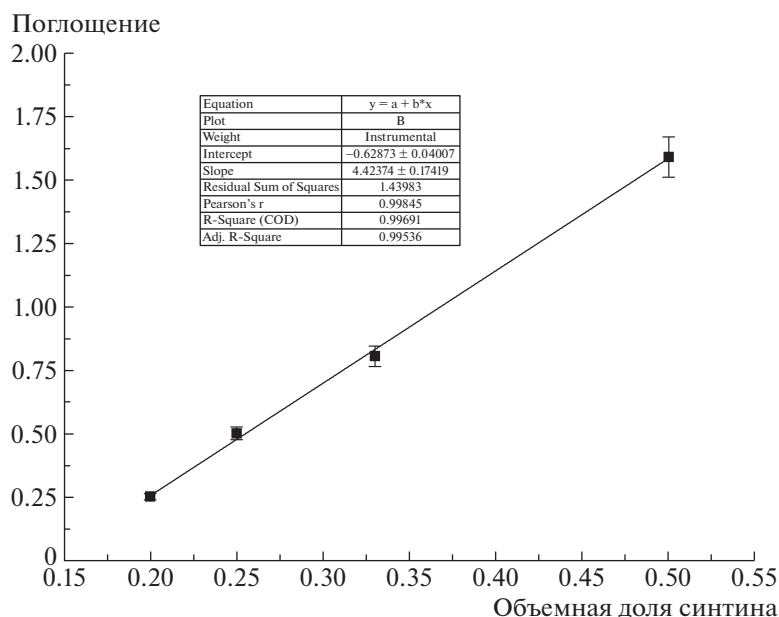


Рис. 4. Поглощение света в зависимости от объемной доли синтина в его растворе с гексаном.

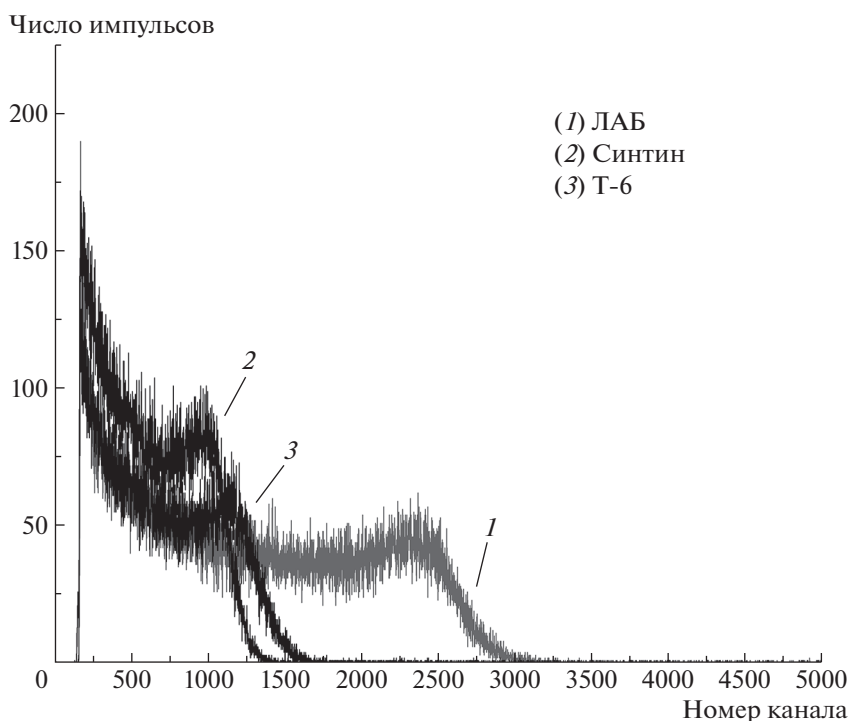


Рис. 5. Амплитудные спектры от ^{137}Cs (662 кэВ) в сцинтилляторах с РРО (3 г/л) на основе: 1 — ЛАБа, 2 — синтина, 3 — ракетного топлива Т-6.

(так называемая бензольная гребенка) лежит в ближнем УФ — с максимумом при 255 нм. Эти три полосы сохраняются в спектрах всех производных бензола. Полосу поглощения при 180 нм на обычных спектрофотометрах с использованием кварцевых кювет увидеть невозможно, но две

остальные на нашем рисунке видны очень ясно, причем, в нашем случае максимум в ближнем УФ — также находится при 255 нм.

На рис. 4 представлена зависимость поглощения света в максимуме при 255 нм от объемной доли синтина в гексане.

Таблица 4. Поглощение (A) и длина ослабления света (L) синтина и ракетного топлива Т-6

№	Образец	A_{\min}	A_{440}	A_{430}	A_{420}	L_{440} , м	L_{430} , м	L_{420} , м
2837	Синтин 1 порц.	-0.0284	-0.0280	-0.0276	-0.0275	>20	>20	>20
2836	Синтин 2 порц.	-0.0281	-0.0272	-0.0268	-0.0264	>20	>20	>20
2835	Синтин исход.	-0.0269	-0.0169	-0.0138	-0.0104	4.3	3.3	2.6
2820	Т-6 1 порц.	-0.0317	-0.0315	-0.0311	-0.0202	>20	>20	>20
2823	Т-6-исход.	-0.0263	-0.0162	-0.0130	-0.0092	4.3	3.3	2.5

Из рис. 4 видно, что зависимость поглощения света от концентрации производных бензола в синтине (которая пропорциональна объемной доли синтина) представляет из себя прямую линию, т.е. подчиняется закону Бера. Откуда, используя коэффициент экстинкции бензола из литературных данных ($\epsilon_{255} = 200$ л/(моль см)), можно легко подсчитать концентрацию бензола (или его производных) в самом синтине. Концентрация бензола или его производных в синтине оказалась равной $C = 0.011$ моль/л.

Поскольку мы не знаем, какие именно производные бензола содержатся в синтине, было также проверено, уменьшается ли содержание их после хроматографической очистки синтина с использованием в качестве сорбента Al_2O_3 (Aluminium Oxide for Chromatography, ТУ 6-09-3916).

Оказалось, что после очистки синтина на Al_2O_3 поглощение света при 255 нм уменьшается незначительно, т.е. в синтине в основном присутствуют неполярные производные бензола, по-видимому, алкилбензолы, не сорбирующиеся на Al_2O_3 .

5. ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОХОДА СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ НОВЫХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ

Основной характеристикой любого сцинтиллятора является световыход (количество фотонов на единицу поглощенной энергии). При исследовании новых сцинтилляторов распространенной практикой является сравнение их световыходов со световыходами известных сцинтилляторов.

В настоящей работе световыход сцинтиллятора измерялся с помощью радиоактивного источника

Таблица 5. Световыход сцинтилляторов (LY) с РРО (3 г/л)

Растворитель	ЛАБ, %	Т-6, %	Синтин, %	Синтин продут аргоном, %
LY	100	51	44	56

^{137}Cs по методике, описанной ранее [19]. В представленных результатах использовалась относительная величина световыхода — т.е. процентное отношение световыхода сцинтиллятора по отношению к эталонному образцу (ЛАБ + РРО (3 г/л)). На рис. 5 представлены амплитудные спектры комптоновского рассеяния гамма-квантов от радиоактивного источника ^{137}Cs (662 кэВ), полученные с использованием образцов сцинтиллятора на основе ЛАБа, ракетного топлива Т-6 (Лукойл) и синтина (“компонент-реактив”). В каждом сцинтилляторе в качестве сцинтилляционной добавки использовался 2,5-дифенилоксазол (РРО) с концентрацией 3 г/л. Все растворители были очищены на Al_2O_3 при соотношении объемов сорбента и растворителя 1 : 1.

Обработка спектра позволяет определить параметр, по которому делается оценка световыхода (LY) — это номер канала анализатора (пропорциональный амплитуде сигнала), соответствующий половине высоты комптоновского края спектра. Световыход сцинтиллятора на основе ЛАБа принимался за 100%. Полученные результаты представлены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что световыход сцинтиллятора на основе ракетного топлива и синтина почти в 2 раза ниже, чем у сцинтиллятора на основе ЛАБа. Продувка сцинтиллятора (на основе синтина) аргоном увеличивает его световыход с 44% до 56%, т.е. практически на 21%.

Меньший световыход сцинтилляторов на основе синтина и ракетного топлива Т-6 по сравнению со сцинтиллятором на основе ЛАБа можно объяснить тем, что в их составе гораздо меньше ароматических углеводородов, чем в ЛАБе. В табл. 6 представлены характеристики известных растворителей, используемых в LS, а также новых (синтина и ракетного топлива), исследованных в настоящей работе. Световыход сцинтиллятора (LY), приготовленного на их основе, приводится в процентах по отношению к сцинтиллятору на основе РС.

Из табл. 6 видно, что существует некоторая корреляция между молярной концентрацией ароматических углеводородов в растворителе (C_M аромат.)

Таблица 6. Характеристики растворителей и сцинтилляторов на их основе

Растворитель	d , г/мл	n^{20}	Число атомов Н на мл	$T_{всп}$, °С	LY, %	C_M аромат. моль/л
РС	0.879	1.504	5.35×10^{22}	48	100	7.3
DIN*	0.96	—	5.45×10^{22}	>140	87	9.0
PXE*	0.985	—	5.08×10^{22}	167	87	9.4
РСН*	0.95	1.526	5.71×10^{22}	99	46	5.9
ЛАВ	0.856	1.482	6.31×10^{22}	130	75	3.5
Додекан	0.75	1.422	6.89×10^{22}	71	40	—
Т-6	0.84	—	—	62	38	—
МО*	0.85	1.46	$(6.73-8.00) \times 10^{22}$	215	33	—
Синтин	0.74	—	6.72×10^{22}	100	33	0.01

*РСН — фенилциклогексан, DIN — диизопропилнафталин, PXE — 1.1-фенилксиллэтан, МО — минеральное масло ($C_{24}-C_{28}$), синтин ($C_{13}-C_{17}$).

и световыходом сцинтиллятора (LY), хотя, очевидно, влияют и другие факторы, в их числе структура ароматических углеводородов.

Молярная концентрация ароматических соединений в ЛАБе, исходя из его плотности (0.856 г/мл) и средней молярной массы алкилбензолов (242.14 г/моль [25]) составляет $C_M = 3.5$ моль/л, в то время как у РС ($d = 0.879$ г/мл, $M = 120.18$ г/моль) молярная концентрация составляет $C_M = 7.3$ моль/л. В отличие от РС, в молекулах ЛАБ фенильные остатки присоединены к внутренним атомам углерода углеводородов линейного строения ($C_{10}-C_{13}$), что приводит к увеличению его прозрачности по сравнению с РС. (т.е. ЛАБ ведет себя как РС, разбавленный, например, додеканом: прозрачность в этом случае увеличивается, но световыход уменьшается.)

Из табл. 6 видно также, что все сцинтилляторы, основанные на растворителях, имеющих в своем составе только предельные углеводороды, имеют низкий световыход: от 33% (МО, синтин) до 40% (додекан).

Однако такие сцинтилляторы имеют одно важное преимущество — они обладают высокой прозрачностью и стабильностью, так как предельные углеводороды не подвержены процессам окисления, что может наблюдаться, например, при использовании в качестве растворителей алкилбензолов [22, 26]. (Преимуществом синтина по сравнению с ракетным топливом Т-6 при прочих практически равных характеристиках является его более высокая температура вспышки.)

Чтобы повысить световыход сцинтилляторов на основе предельных углеводородов, можно добавлять в их состав ароматические углеводороды, как

было сделано, например, в эксперименте Double Choоз, где в качестве основных растворителей использовался додекан 80% и PXE (20%) [5] или KamLAND [12], в котором растворителем служит смесь додекана (80%) и РС (20%).

6. ИССЛЕДОВАНИЕ Nd-СОДЕРЖАЩИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ СИНТИНА И ЛАБ

Для исследования возможности использования синтина для создания Nd-содержащего сцинтиллятора был приготовлен концентрат трис-(3,5,5-триметилгексоаната) неодима в псевдокумоле с концентрацией по неодиму 62 г/л.

Концентрат неодима готовился по методике, разработанной нами ранее для создания Gd-LS [27]. (Концентрация неодима в концентрате определялась методом комплексометрического титрования (с ЭДТА) с применением ацетатного буферного раствора (pH = 5.8) и индикатора ксиленолового оранжевого. Предварительно проводилась реэкстракция неодима 3M раствором азотной кислоты.)

Далее концентрат неодима в РС использовался для приготовления Nd-содержащих сцинтилляторов на основе синтина и для сравнения на основе ЛАБа. Объем основного растворителя составлял 85% от общего объема сцинтиллятора, а объем концентрата в РС соответственно 15%. Концентрация неодима в сцинтилляторе составила 9 г/л. В каждый сцинтиллятор добавлялась сцинтилляционная добавка PPO из расчета 3 г/л. Световыход исследуемых Nd-LS измерялся по той

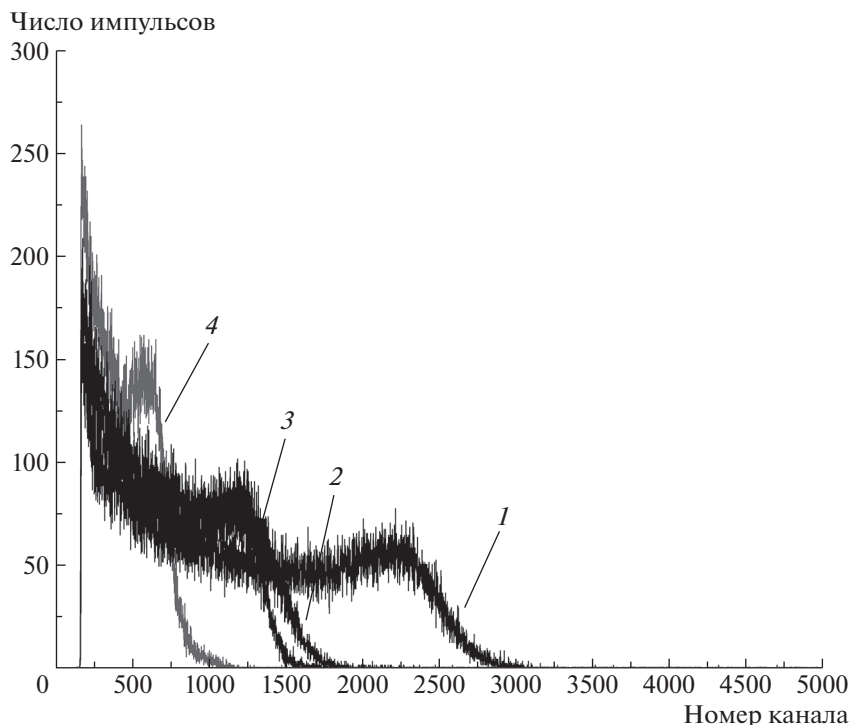


Рис. 6. Амплитудные спектры от ^{137}Cs (662 кэВ) в сцинтилляторах с РРО (3 г/л) на основе: 1 — ЛАБ, 2 — (ЛАБ 85% + РС 15%), $C_{\text{Nd}} = 9$ г/л, 3 — (синтин 85% + РС 15%), $C_{\text{Nd}} = 9$ г/л, 4 — концентрат Nd в РС ($C_{\text{Nd}} = 62$ г/л).

же методике, которая описана выше. Амплитудные спектры от ^{137}Cs (662 кэВ) в полученных неодим-содержащих сцинтилляторах представлены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что амплитудные спектры Nd-LS на основе синтина и на основе ЛАБ, приготовленные с использованием одного и того же концентрата неодима в РС, близки друг к другу. В табл. 7 даны значения световых выходов Nd-LS, вычисленные по отношению к сцинтиллятору на основе чистого ЛАБ с той же концентрацией РРО.

Из табл. 7 видно, что световой выход Nd-LS на основе ЛАБ и синтина с добавкой концентрата неодима в РС, имеют близкие и довольно высокие значения (63 и 60% соответственно при концентрации неодима 9 г/л).

Таким образом, было показано, что синтин (“компонент-реактив”) с добавлением ароматических углеводородов типа РС может быть ис-

пользован в качестве основного растворителя для приготовления Nd-LS. Однако для определения стабильности Nd-LS (ухудшения его характеристик со временем) и нахождения оптимального процентного соотношения между синтином и ароматическим углеводородом требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FZZR-2022-0004.

В работе использовано научное оборудование Центра исследования строения молекул ФГБУН “Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН” (ИНЭОС РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Tam for the SNO+ Collab., arXiv: 2211.05538v1 [hep-ex].
2. Yu. M. Malyshkin, A. N. Fazliakhmetov, A. M. Gagnapshv, V. N. Gavrin, T. V. Ibragimova, M. M. Kochkarov, V. V. Kazalov, D. Yu. Kudrin, V. V. Kuzminov, B. K. Lubsandorzhiyev, G. Ya. Novikova, V. B. Petkov, A. A. Shikhin, A. Yu. Sidorenkov, N. A. Ushakov, E. P. Veretenkin, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **951**, 162920 (2020).
3. The JUNO Collab., arXiv: 2103.16900v1 [physics.ins-det].
4. Borexino Collab. (M. Agostini *et al.*), Nature **562**, 505 (2018); <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0624-y>

Таблица 7. Световой выход (LY) Nd-сцинтилляторов с РРО (3 г/л)

Сцинтиллятор	ЛАБ, %	Nd (9 г/л) ЛАБ + РС, %	Nd (9 г/л) Синтин + РС, %	Nd (62 г/л) Концентрат в РС, %
LY	100	63	60	32

5. H. De Kerret (Double Chooz Collab.), *Nature Phys.* **16**, 558 (2020).
6. W. Beriguete, J. Cao, Y. Ding, S. Hans, K. M. Heeger, L. Hu, A. Huang, K. Luk, I. Nemchenok, M. Qi, R. Rosero, H. Sun, R. Wang, Y. Wang, L. Wen, Y. Yang, M. Yeh, Z. Zhang, and L. Zhou, *Nucl. Instrum. Methods A* **763**, 82 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.119>
7. RENO Collab. (H. S. Kim *et al.*), *Part. Phys. Pros.* **265–266**, 93 (2015).
8. NEOS Collab. (Y. J. Ko, B. R. Kim, J. Y. Kim, B. Y. Han, C. H. Jang, E. J. Jeon, K. K. Joo, H. J. Kim, H. S. Kim, Y. D. Kim, J. Lee, J. Y. Lee, M. H. Lee, Y. M. Oh, H. K. Park, H. S. Park, *et al.*), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 121802 (2017).
9. C. Buck, B. Gramlich, M. Lindner, *et al.*, *JINST* **14**, P01027 (2019).
10. A. P. Serebrov and R. M. Samoilov, *JETP Lett.* **112**, 199 (2020).
11. A. Abramov, A. Chepurnov, A. Etenko, M. Gromov, A. Konstantinov, D. Kuznetsov, E. Litvinovich, G. Lukyanchenko, I. Machulin, A. Murchenko, A. Nemeryuk, R. Nugmanov, B. Obinyakov, A. Oralbaev, A. Rastimeshin, M. Skorokhvatov, *et al.*, arXiv: 2112.09372 [physics.ins-det]; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.09372>
12. A. Gando *et al.* (KamLAND Collab.), *Phys. Rev. C* **92**, 055808 (2015); <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.055808>
13. SNO+ Collab. (M. R. Anderson *et al.*), arXiv: 2011.12924v2 [physics.ins-det].
14. L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, E. A. Yanovich, *et al.*, *Russ. J. Inorg. Chem.* **66**, 421 (2021); <https://doi.org/10.1134/S0036023621030037>
15. I. Fucuda, S. Hizaide, I. Ogawa, *et al.*, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1468**, 012139 (2020); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012139>
16. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, A. V. Veresnikova, *et al.*, *Phys. Part. Nucl.* **82**, 89 (2019); <https://doi.org/10.1134/S1063778819020029>
17. L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, E. A. Yanovich, *et al.*, *Russ. J. Inorg. Chem.* **63**, 1564 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0036023618120045>
18. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, and E. A. Yanovich, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **15**, 630 (2018).
19. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, and E. A. Yanovich, *Instrum. Exp. Tech.* **60**, 533 (2017); <https://doi.org/10.1134/S0020441217030162>
20. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, С. Cattadori, Н. А. Данилов, А. Di Vacri, А. Ianni, S. Nisi, Г. Я. Новикова, F. Ortica, А. Romani, С. Salvo, О. Ю. Смирнов, Е. А. Янович, ПТЭ, № 5, 37 (2012) [*Instrum. Exp. Tech.* **55**, 545 (2012)].
21. E. P. Veretenkin, V. N. Gavrin, B. A. Komarov, Yu. P. Kozlova, A. D. Lukanov, V. P. Morgalyuk, A. M. Nemeryuk, and G. Ya. Novikova, *Phys. At. Nucl.* **85**, 588 (2022).
22. G. Ya. Novikova, M. V. Solovyova, and E. A. Yanovich, *Phys. At. Nucl.* **83**, 75 (2020).
23. А. М. Пшуков, Ш. И. Умеров, Препринт ИЯИ РАН 1442/2019 (Москва, 2019).
24. О. В. Свердлова, *Электронные спектры в органической химии* (Изд-во Химия, Москва, 1973).
25. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, А. С. Чепурнов, Препринт ИЯИ РАН № 1382/2014 (Москва, 2014).
26. Н. И. Бакулина, Г. Я. Новикова, А. С. Редчин, Т. В. Бухаркина, С. В. Вержичинская, М. Г. Макаров, В. В. Зинченко, И. Ю. Кузнецов, *Хим. пром. сегодня*, № 3, 38 (2018).
27. Г. Я. Новикова, Н. И. Бакулина, А. В. Вологжанина, Б. В. Локшин, В. П. Моргалюк, *ЖНХ* **61**, 270 (2016) [*Russ. J. Inorg. Chem.* **61**, 257 (2016)].

NEW BASIC SOLVENTS FOR LIQUID ORGANIC SCINTILLATORS. DEVELOPMENT OF Nd-LOADING SCINTILLATORS BASED ON SYNTHINE AND PSEUDOCUMENE

**I. R. Barabanov^{1,2)}, A. V. Veresnikova^{1,2)}, A. A. Moiseeva³⁾, V. P. Morgalyuk³⁾,
G. Ya. Novikova^{1,2)}, E. A. Yanovich^{1,2)}**

¹⁾ *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²⁾ *Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov, Nalchik, Russia*

³⁾ *A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

New base solvents synthine and T-6 propellant are being researched to create liquid organic scintillators. The light attenuation length of these solvents (both obtained from the manufacturer and after chromatographic purification on Al₂O₃) was measured, as well as the relative light yield of scintillators based on them. The chemical composition of synthine was determined by the method of chromatomass spectrometry and UV spectrophotometry. Based on a mixture of synthine and pseudocumene, an Nd-loaded scintillator ($C_{Nd} = 9 \text{ g/l}$) was produced and its light yield ($LY = 60\%$) was measured relative to a scintillator based on linear alkylbenzene (LAB).