

УДК 539.1.074.3

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА Nd-СОДЕРЖАЩЕГО СЦИНТИЛЛЯТОРА С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ ЕГО СВЕТОВЫХОДА И СТАБИЛЬНОСТИ

© 2025 г. А. В. Вересникова^{1,2)}, З. Ю. Исупова²⁾, Б. В. Локшин³⁾, В. П. Моргалюк³⁾,
А. М. Немерюк⁴⁾, Г. Я. Новикова^{1,2),*}, С. А. Эльчепарова²⁾, Е. А. Янович^{1,2)}

Поступила в редакцию 20.12.2024 г.; после доработки 20.12.2024 г.; принята к публикации 20.12.2024 г.

На основе 3,5,5-триметилгексаноата Nd(III) и дополнительного растворителя ТБФ в ЛАБ разработан оптимальный состав жидкого органического сцинтиллятора для поиска двойного безнейтринного β -распада. Методом ИК-спектроскопии показано, что ТБФ образует дополнительные координационные связи с карбоксилатом неодима и тем самым препятствует его гидролизу и полимеризации. Показано, что наиболее чувствительным методом исследования чистоты и стабильности сцинтиллятора является УФ-спектрофотометрия. Световой выход сцинтиллятора состава [ЛАБ + ВРО (3 г/л) + ТБФ (6.3%) + Nd (5.9 \pm 0.2 г/л)] равен 78% относительно сцинтиллятора [ЛАБ + ВРО (3 г/л)].

Ключевые слова: жидкий органический сцинтиллятор, двойной безнейтринный β -распад, ИК-спектроскопия, полимеризация, УФ-спектрофотометрия, световой выход

DOI: 10.31857/S0044002725020021, EDN: GLAXRG

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области нейтринной физики, особенно связанные с поиском безнейтринной моды двойного бета-распада ($0\nu\beta\beta$), являются одними из наиболее актуальных [1]. Возможность обнаружения этой моды допускается в рамках теории, выходящей за пределы стандартной модели элементарных частиц. В качестве объекта поиска достаточно давно обсуждается изотоп ^{150}Nd [2–5]. В эксперименте NEMO-3 [6] (Neutrino Ettore Majorana Observatory) на обогащенном изотопе ^{150}Nd был измерен период полураспада двухнейтринного двойного бета-распада ($2\nu\beta\beta$) и установлен предел на безнейтринный процесс ($0\nu\beta\beta$). Все эксперименты по поиску безнейтринного двойного бета-распада основываются на предположении майорановской природы нейтрино, т.е. тождественности нейтрино и ее античастицы (антинейтрино). Экспериментальным подтверждением безнейтринного распада будет являться регистрация пары электронов, чья суммарная кинетическая энергия ($Q_{\beta\beta}$) равна максимальной энергии электронов в спектре двухнейтринного

распада ($2\nu_{\beta\beta}$) ядра изотопа, для ядра изотопа ^{150}Nd она составляет 3.368 МэВ. Большая энергия распада ядра изотопа ^{150}Nd ($Q_{\beta\beta}$) делает его привлекательным для поиска $0\nu\beta\beta$ -распада, поскольку превышает фон от гамма-квантов, связанных с естественными радиоактивными элементами ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K . В случае использования в качестве детектора жидкого органического сцинтиллятора энергия $Q_{\beta\beta}$ будет также превышать энергию альфа-частиц от распада U, Th (ионизационное гашение).

В отличие от трековых установок (типа NEMO) создание детектора по поиску $0\nu\beta\beta$ -распада на основе Nd-содержащего жидкого органического сцинтиллятора (Nd-LS) не позволит регистрировать отдельные траектории электронов от распада ^{150}Nd . Однако в таком типе детектора есть свои преимущества, а именно, относительная легкость масштабирования до больших размеров, эффективность регистрации электронов 100% (так как исследуемый изотоп ^{150}Nd находится внутри и является частью детектора), а также возможность глубокой очистки от радиоактивных примесей.

Одним из внутренних источников фона, связанных с изотопом ^{150}Nd , является двухнейтринный двойной бета-распад $2\nu\beta\beta$ [7]. Для дискриминации этого фона желательно иметь детектор с максимальным энергетическим разрешением. Известно, что детекторы, содержащие жидкие органические сцинтилляторы, уступают полупро-

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.

⁴⁾ НИЦ “Курчатовский институт” — ИРЕА, Москва, Россия.

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

водниковым детекторам по разрешению. Поэтому большое значение имеют исследования, связанные с разработкой состава Nd-содержащего сцинтиллятора, характеристики которого позволят достичь разрешения на уровне 3.5% (3.368 МэВ) [8]. Световых выход сцинтиллятора (число фотонов на единицу поглощенной энергии) — одна из важнейших характеристик, которая определяет энергетическое разрешение детектора. Помимо световых выходов такие характеристики сцинтилляционного детектора, как длина ослабления света сцинтиллятора и стабильность его параметров также очень важны для возможности реализации таких уникальных экспериментов. В работах [9–18] приведены результаты исследований по разработке Nd-содержащего жидкого органического сцинтиллятора, осуществленные в последние годы.

В настоящей работе авторами сделан акцент на методе введения соединения неодима в базовый растворитель (ЛАБ), а также тщательном подборе и очистке всех компонентов сцинтиллятора с целью улучшения его сцинтилляционных характеристик и стабильности. В качестве соединений неодима рассматриваются карбоксилаты неодима, методика синтеза которых подробно изложена в нашей работе [19].

2. ОЧИСТКА ЛАБ

За основу сцинтиллятора был выбран ЛАБ (линейный алкилбензол), который в настоящее время широко используется во многих экспериментах нейтринной физики, самым масштабным из которых является JUNO (20 кт) [20]. В России ЛАБ выпускается только на одном предприятии (ООО “Киниф”, Кириши), его состав и характеристики были исследованы авторами ранее в работах [21–23]. К сожалению, в настоящее время ЛАБ невозможно приобрести непосредственно у производителя. Характеристики разных партий ЛАБ, приобретенных у посредников, сильно различаются. Поэтому ЛАБ из каждой партии требует дополнительной проверки и очистки.

В нашем случае ЛАБ был дополнительно очищен на Al_2O_3 (Type WN-6, Neutral, Activity Grade Supper I (Fluka)) при соотношении объемов Al_2O_3 и ЛАБ = 1 : 4.3 (колонка диаметром 4 см, длина столба сорбента — 19 см).

На рис. 1 представлен УФ-спектр ЛАБ до и после очистки. Для измерений использовались 10 см кварцевые кюветы, эталоном служила пустая кювета, спектрофотометр Perkin Elmer Lambda 35.

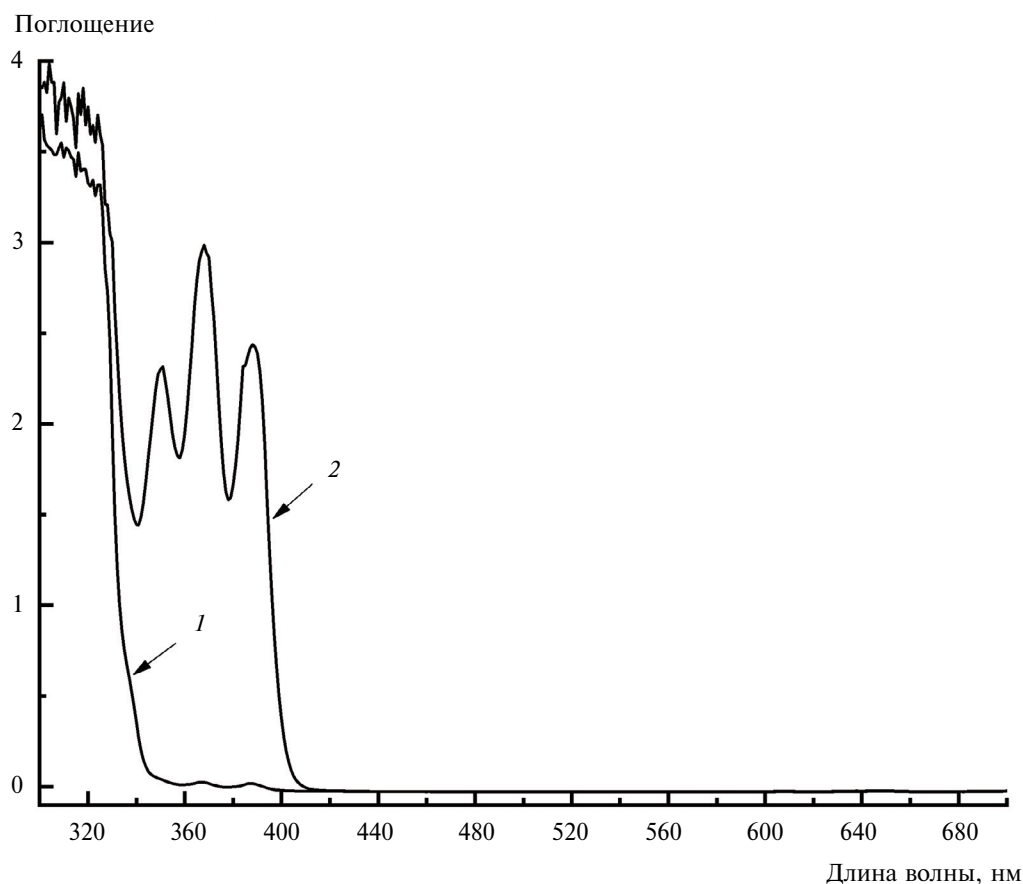


Рис. 1. УФ-спектры ЛАБ: 1 — ЛАБ очищенный на Al_2O_3 (Fluka), 2 — ЛАБ исходный.

Из рис. 1 видно, что на спектре исходного ЛАБ видны 3 пика с максимумами 350, 368 и 389 нм, которые, как было доказано в работах [21, 22], принадлежат 9-метилантрацену. После очистки на Al_2O_3 (Fluka) эти сигналы почти полностью исчезают.

В табл. 1 представлены значения поглощения (A) и длины ослабления света (L), которая рассчитывалась по формуле

$$L_{440} = 10/2.3(A_{440} - A_{\min}),$$

где L_{440} — длина ослабления света при 440 нм, A_{440} — поглощение света при 440 нм, A_{\min} — минимальное поглощение света в области 500–700 нм.

Из табл. 1 видно, что длина ослабления света ЛАБ после очистки на Al_2O_3 (Type WN-6, Neutral, Activity Grade Supper I (Fluka)) в области 420–440 нм (область наибольшей чувствительности ФЭУ) значительно увеличилась.

3. ТБФ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РАСТВОРИТЕЛЬ ДЛЯ ВВЕДЕНИЯ КАРБОКСИЛАТОВ В СОСТАВ ЖИДКОГО СЦИНТИЛЛЯТОРА

Известно, что карбоксилаты лантаноидов легко вводятся в жидкий сцинтиллятор путем их экстракции из водных растворов, этот метод был использован для получения многих Gd-содержащих сцинтилляторов [24–27]. Однако хорошо высушенные карбоксилаты, не содержащие в своем составе воду или избыток свободной кислоты, плохо растворяются в углеводородных растворителях. Причем со временем их растворимость понижается. Поэтому для растворения сухих карбоксилатов, а также β -дикетонатов используют дополнительный растворитель, в котором они хорошо растворяются, например, тетрагидрофуран (ТГФ) [28–30]. В нашей работе для этих целей предлагается использовать трибутилфосфат (ТБФ), который в отличие от ТГФ имеет высокую температуру кипения и вспышки ($T_{\text{кип}} = 289^\circ\text{C}$, $T_{\text{всп.}} = 146^\circ\text{C}$) и будет более безопасен при использовании сцинтилляторов в подземных лабораториях.

Ранее [31] алкилфосфат уже использовался для создания Gd-содержащих сцинтилляторов, но в этой работе в качестве основного растворителя использовался α -гидрокситолуол, а гадолиний вводился в жидкий сцинтиллятор в виде гексагидрата тринитрата гадолиния, который не мог обеспечить длительную стабильную работу сцинтиллятора.

Для создания сцинтиллятора важно, чтобы используемый ТБФ не оказывал большого влияния на длину ослабления света сцинтиллятора в области 420–440 нм. С этой целью были измерены УФ-спектры ТБФ разных поставщиков: Merck 99% (партия S8169404, дата 09.21, срок хранения 5 лет) и Chemical Line (99%, 2021 г.). Полученные УФ-спектры представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что поглощение света у ТБФ фирмы Merck меньше, чем у ТБФ фирмы Chemical Line. Также были предприняты попытки очистки ТБФ (Chemical Line) с целью увеличения его прозрачности. Для очистки применялись следующие методы: 1) промывка ТБФ водным раствором аммиака, с последующей азеотропной отгонкой воды с помощью н-гексана, 2) очистка ТБФ на ионообменной смоле АВ-17-8.

В табл. 2 приведены значения поглощения (A) и длины ослабления света (L) при 440 нм для ТБФ разных производителей (Merck и Chemical Line). А также для ТБФ (Chemical Line), очищенного промывкой 2%-ным водным раствором аммиака (отношение фаз 1/20) или на ионообменной смоле АВ-17-8 (отношение фаз 1/100 по массе). Длина ослабления света рассчитывалась по формуле

$$L_{440} = 10/2.3(A_{440} - A_{\min}).$$

Из табл. 2 видно, что наиболее прозрачным оказался ТБФ (99%, Merck). Очистка ТБФ (Chem. Line) с помощью промывки водным раствором аммиака с последующей азеотропной отгонкой воды с помощью н-гексана, а также очистка на ионообменной смоле АВ-17-8 не приводят к значительному увеличению длины ослабления света.

4. ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТБФ И РАСТВОРОВ ТБФ С КАРБОКСИЛАТОМ НЕОДИМА

Согласно литературным данным [32], полоса поглощения группы Р=О чистого безводного ТБФ имеет максимум при $1282\text{--}1285\text{ см}^{-1}$, при этом присутствие воды понижает частоту указанной полосы на $15\text{--}20\text{ см}^{-1}$.

Наши исследования показали, что ИК-спектры всех образцов ТБФ (независимо от фирмы-производителя и способа очистки) оказались практически идентичными. Поэтому мы приводим только

Таблица 1. Значения поглощения (A) и длины ослабления света (L) образцов ЛАБ

Образец	A_{\min}	A_{440}	A_{430}	A_{420}	$L_{440}, \text{м}$	$L_{430}, \text{м}$	$L_{420}, \text{м}$
ЛАБ очищенный	–0.0263	–0.0249	–0.0242	–0.0235	31.1	20.7	15.5
ЛАБ исходный	–0.0286	–0.0256	–0.0233	–0.0209	14.5	8.2	5.7

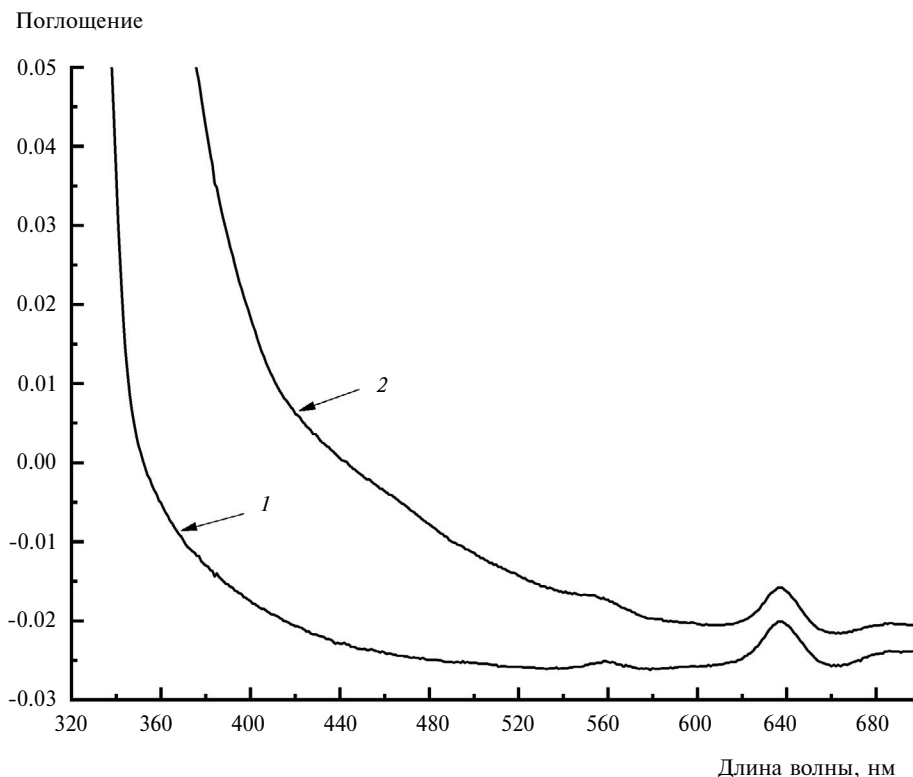


Рис. 2. УФ-спектры поглощения ТБФ: 1 — ТБФ (99%, Merck), 2 — ТБФ (99%, Chemical Line).

Таблица 2. Значения поглощения (A_{440}) и длины ослабления света (L_{440}) для разных образцов ТБФ

Образец	A_{\min}	A_{440}	L_{440} , м
ТБФ (99%, Merck)	-0.0260	-0.0229	14.0
ТБФ (99%, Chemical Line) — исходный	-0.0192	0.0019	2.1
ТБФ (Chem. Line) — очищен промывкой	-0.0191	0.0008	2.2
ТБФ (Chem. Line) — очищен на смоле АВ-17-8	-0.0126	0.0048	2.5

один ИК-спектр ТБФ (Merck), представленный на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что полоса поглощения фосфорильной группы $P=O$ находится при 1278 см^{-1} . Полоса поглощения воды отсутствует.

На рис. 4 представлен ИК-спектр 0.5М раствор $Nd(TMHA)_3$ в ТБФ (Merck).

Из рис. 4 видно, что в присутствии соли $Nd(TMHA)_3$ в области поглощения фосфорильной группы появляется другой максимум при 1260 см^{-1} , что свидетельствует о том, что между группой $P=O$ и ионом неодима устанавливаются дополнительные координационные связи. На рис. 4 видны также характеристические полосы поглощения карбоксилата неодима, а именно асимметричного (1538 см^{-1}) и симметричного (1419 см^{-1}) колебаний депротонированной карбоксилатной группы $-OCO-$.

Эти же характеристические полосы видны на ИК-спектре сухой соли: (1536 см^{-1}) и (1410 см^{-1}) (рис. 5).

Но, кроме того, на ИК-спектре сухой соли видна полоса поглощения при 1691 см^{-1} , которая соответствует валентным колебаниям связи $C=O$ и относится, очевидно, к карбоновой кислоте, связанной с ионом неодима (небольшой избыток карбоновой кислоты подтвердил также элементный анализ).

Также на рис. 5 видна полоса поглощения с максимумом при 3131 см^{-1} , которая относится к валентным колебаниям гидроксидной группы OH . Но на спектре раствора комплекса неодима в ТБФ (рис. 4) эта полоса отсутствует. При растворении $Nd(TMHA)_3$ в ТБФ выпадает небольшой осадок, который, вероятно, содержит гидратированные формы комплекса неодима, которые могли

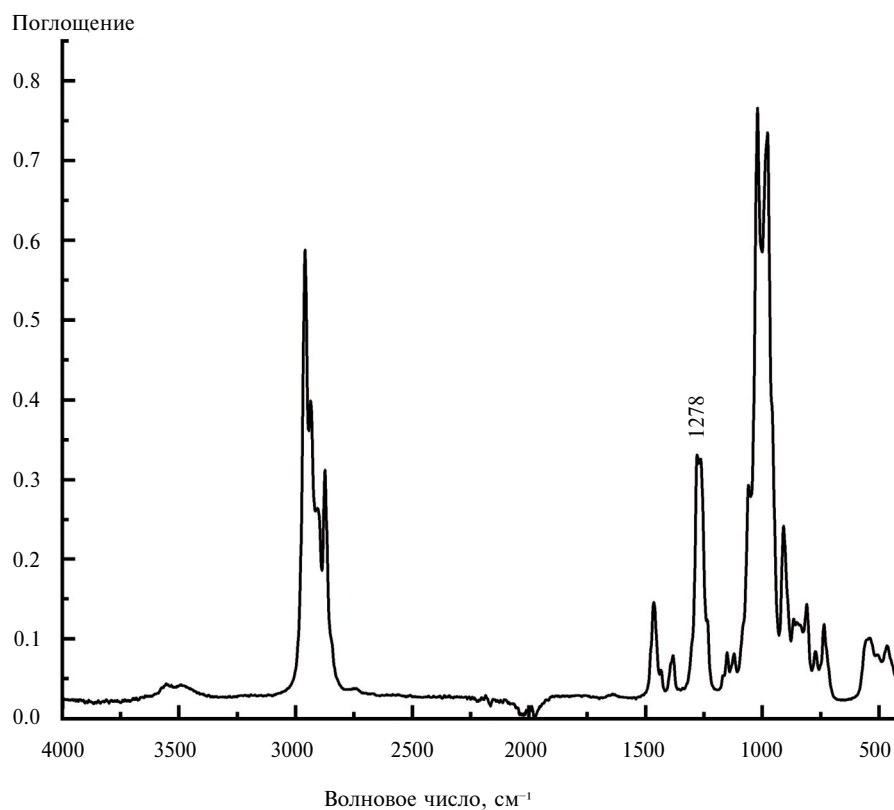


Рис. 3. ИК-спектр ТБФ (Merck).

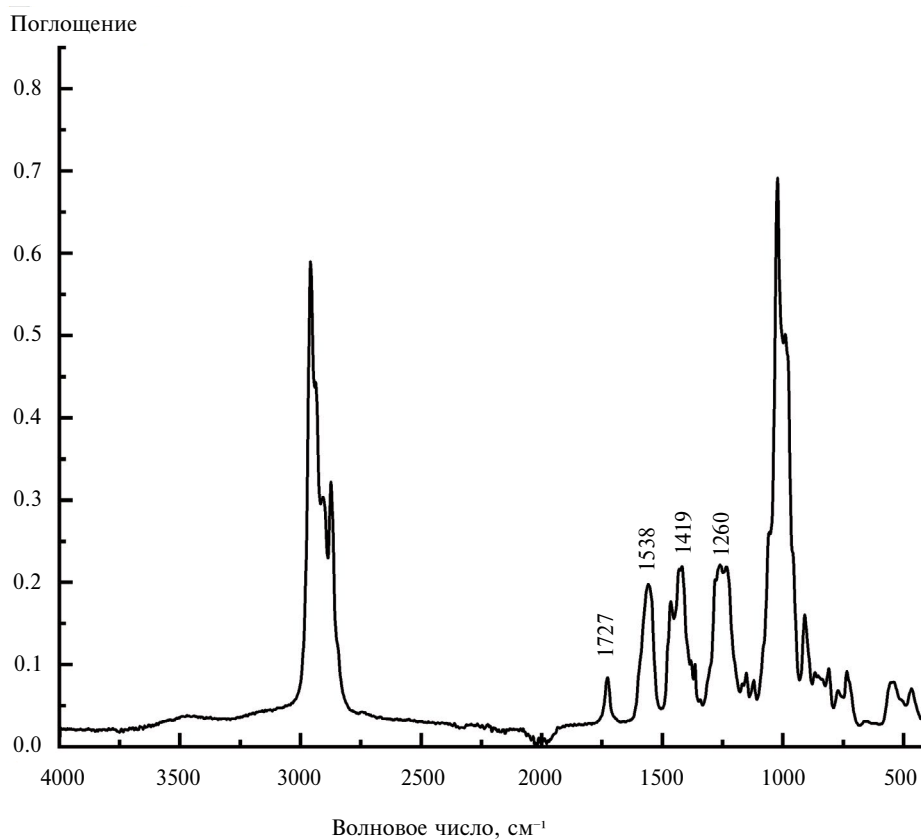


Рис. 4. ИК-спектр 0.5М раствора $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ в ТБФ (Merck).

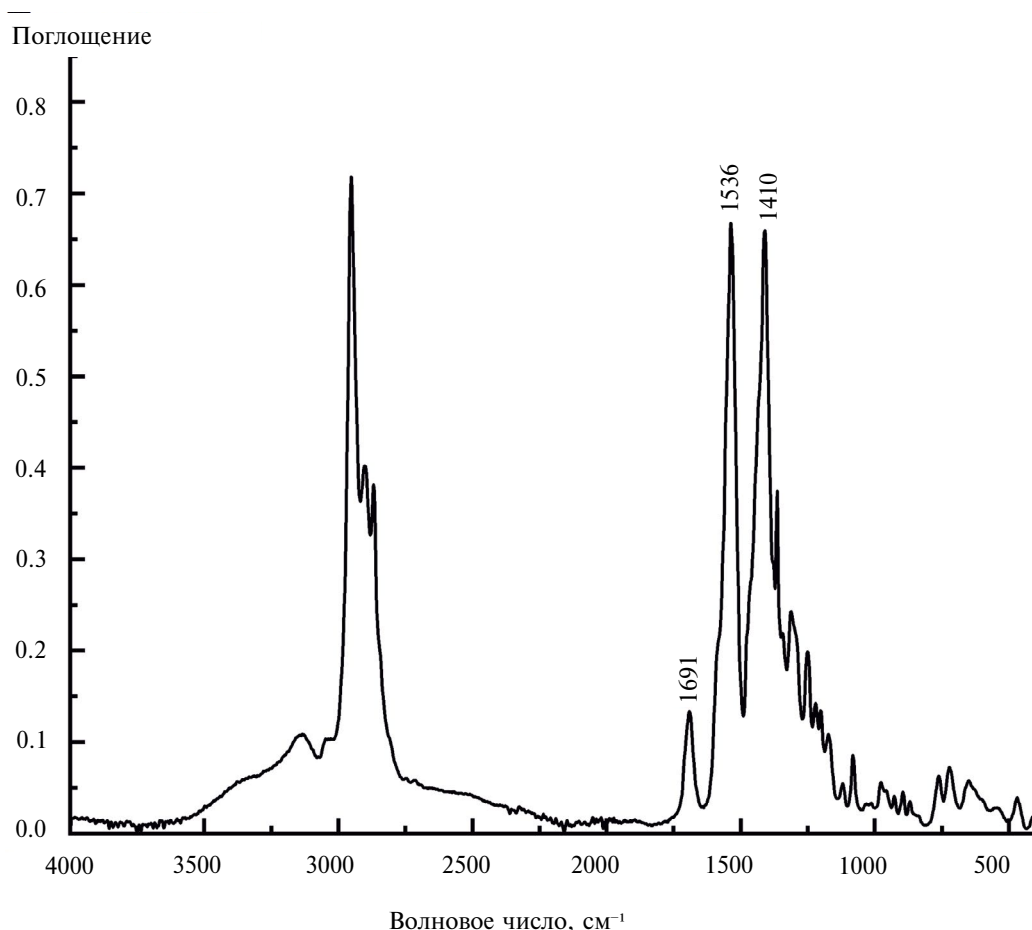


Рис. 5. ИК-спектр сухой соли $\text{Nd}(\text{TMNA})_3$.

образоваться вследствие гидролиза соли при ее хранении.

На рис. 4 видно, что полоса поглощения карбоксильной группы находится при 1727 см^{-1} , что говорит о том, что в растворе ТБФ карбоновая кислота находится в свободном виде, ТБФ вытесняет ее из координационной сферы неодима так же, как и воду.

Таким образом, ИК-спектрометрические исследования раствора $\text{Nd}(\text{TMNA})_3$ в ТБФ, сухой соли $\text{Nd}(\text{TMNA})_3$ и чистого растворителя ТБФ показали, что при растворении неодимового комплекса в ТБФ фосфорильные группы молекул ТБФ образуют координационные связи с ионом неодима, о чем свидетельствует сдвиг характеристической полосы $\text{P}=\text{O}$ группы в низкочастотную область. Таким образом, можно полагать, что ТБФ, образуя координационные связи с $\text{Nd}(\text{TMNA})_3$, будет препятствовать его гидролизу с последующей полимеризацией, ведущей к образованию и выпадению осадков в сцинтилляторе.

В предыдущей работе [9] нами было найдено, что световыход сцинтиллятора при введении

неодима в виде концентрированных растворов $\text{Nd}(\text{TMNA})_3$ в ТБФ выше, чем без него. (Концентрация неодима в концентратах ТБФ составляла 72.5 г/л (0.5 моль/л). После приготовления концентратов неодима в ТБФ они обязательно фильтруются через специальные фильтры с диаметром пор $0.05\text{--}0.1\text{ мкм}$ для удаления нерастворимых примесей.)

5. ВЛИЯНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДОБАВОК НА ДЛИНУ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА И СВЕТОВЫХОД СЦИНТИЛЛЯТОРА

Сцинтилляционные добавки являются важными составляющими сцинтиллятора. От их концентрации и уровня чистоты зависит не только световыход, но и длина ослабления света (длина, на которой происходит ослабление света в e раз), что особенно важно для сцинтилляторов большого объема.

В нашей работе были проведены спектрофотометрические исследования растворов РРО (2,5-дифенилоксазол) от двух разных производителей и ВРО (2-(4-дифенил)-5-фенилоксазол, очищен-

ный перекристаллизацией) в ЛАБе. УФ-спектры поглощения этих растворов приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что, несмотря на то что у ВРО коэффициент экстинкции выше, чем у РРО и максимум его смещен в длинноволновую область ($\epsilon_{320} = 45500$ л/моль см [33]), поглощение света в области 400–700 нм в растворе ВРО гораздо меньше, чем в растворах РРО ($\epsilon_{303} = 37500$ л/моль см), причем в растворе РРО (Aldrich) поглощение меньше, чем в растворе со старым образцом РРО, произведенным в 1992 г.

В табл. 3 приведена длина ослабления света исследуемых растворов при 440 нм. Длина ослабления света подсчитывалась по формуле $L_{440} = 10/2.3(A_{440} - A_{\min})$.

Из рис. 6 и табл. 3 видно, что введение в сцинтиллятор сцинтиляционной добавки РРО, взятой после длительного хранения и без очистки, приводит к очень сильному уменьшению длины ослабления света сцинтиллятора, и поэтому она должна

быть предварительно очищена. Так, в эксперименте Daya Bay [26] очистке РРО (фильтрация после плавления, перегонка и перекристаллизация) придавалось большое значение, что приводило к значительному улучшению оптических свойств концентрированного раствора РРО в ЛАБе (10 г/л).

Безусловно, влияние сцинтилляционных добавок (вернее, примесей, содержащихся в них) на длину ослабления света будет сказываться только при условии использования сцинтилляторов больших объемов. При измерении световых выходов в маленьких объемах такое влияние будет незаметно.

В табл. 4 представлен относительный световыход (LY, %) образцов сцинтиллятора, измеренный при использовании объемов 5 мл и радиоактивного источника ^{137}Cs . В настоящей работе использовался метод, основанный на амплитудном анализе импульсов, когда измерения производятся в одних условиях и амплитуда импульса пропорциональна

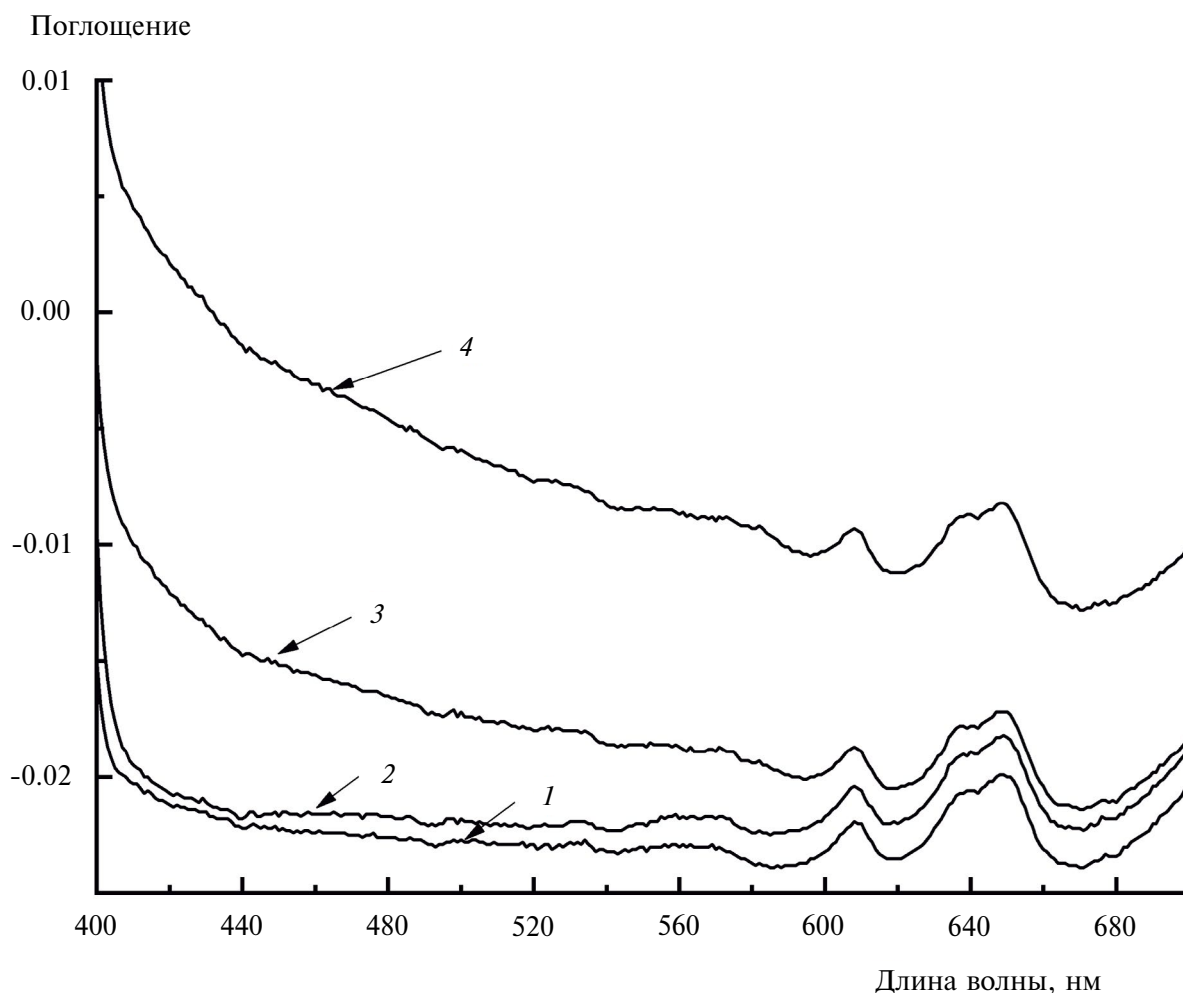


Рис. 6. УФ-спектры: 1 — ЛАБ, 2 — ЛАБ + ВРО, 3 — ЛАБ + РРО (Aldrich), 4 — ЛАБ + РРО (Реахим 1992 г., партия 8). Концентрации всех добавок 3 г/л.

Таблица 3. Значения длины ослабления света (L_{440}) в зависимости от введенных добавок

Образец	L_{440} , м
Чистый ЛАБ	>20
ЛАБ + ВРО	>20
ЛАБ + РРО (Aldrich)	7.6
ЛАБ + РРО (1992 г., партия 8)	4.4

световыходу. Для сравнения в качестве стандарта использовался световыход свежеприготовленного сцинтиллятора на основе очищенного ЛАБ (РРО Aldrich, 3 г/л).

Известно [34], что световыход с ВРО выше, чем с РРО, из-за меньшего перекрывания УФ-спектров поглощения и эмиссионных спектров ВРО, по сравнению с аналогичными спектрами РРО. Поэтому при использовании ВРО нет необходимости вносить дополнительные шифтеры, такие как РОРОР и bis-MSB(1,4-бис(2-метилстирил)бензол), как это обычно делается для увеличения световыхода при использовании РРО. С добавкой bis-MSB к ВРО наблюдается только очень небольшое увеличение световыхода.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ND-LS

Под стабильностью сцинтиллятора понимается неизменность его характеристик со временем. Основными характеристиками Nd-LS являются световыход, длина ослабления света и концентрация неодима.

Концентрация неодима измерялась методом комплексонометрического титрования с использованием 0.05М раствора Трилона-Б (динатревой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты) и индикатора ксиленолового оранжевого в присутствии ацетатного буфера (рН 5.8) при нагреве. Пробы отбирались непосредственно из органического раствора сразу после приготовления сцинтиллятора и после хранения в течение 2.5 мес. Концентрация неодима в обоих случаях составила $C_{Nd} = 5.9 \pm 0.2$ г/л.

Кроме того, концентрация неодима (после хранения) была измерена с использованием мето-

да ICP OES (прибор OPTIMA 7000 DV), для чего неодим был рекстрагирован из сцинтиллятора 4М раствором HCl (при соотношении фаз 1 : 1) (с дальнейшим последовательным разбавлением в 12.5 и 11 раз). При измерении использовался стандарт с $C_{Nd} = 10$ мг/л в 5% HNO_3 (Atomic Spectroscopy Standard CAS [7697-37-2]). Концентрация неодима в этом случае составила $C_{Nd} = 6.18 \pm 0.03$ г/л, что в пределах ошибки практически совпадает с концентрацией, измеренной титриметрическим методом.

Световыход измерялся по ранее описанной методике [14]. Объем образца составлял 5 мл. В качестве эталона был взят раствор ВРО в ЛАБе с концентрацией 3 г/л (этот же раствор использовался для приготовления Nd-LS). На рис. 7 представлены амплитудные спектры образцов Nd-LS, один из которых был взят сразу после приготовления сцинтиллятора и хранился под воздухом в течение 2.5 мес., второй образец был отобран из сцинтиллятора спустя 48 дней хранения под аргоном.

Из рис. 7 видно, что амплитудные спектры от ^{137}Cs (662 кэВ) в образцах Nd-LS, хранившихся под воздухом и аргоном, практически совпадают.

В табл. 5 даны значения относительного световыхода образцов Nd-LS: 1) отобранного сразу после приготовления Nd-LS до продувки аргоном, 2) того же образца спустя 72 дня после хранения на воздухе и 3) образца, отобранного из Nd-LS, который 48 дней хранился под аргоном.

Из табл. 5 видно, что световыход двух образцов сцинтиллятора, измеренных через неделю и спустя более 2 мес. хранения, практически одинаковый. Также он совпадает со световыходом образца, который был взят после хранения (48 дней) под аргоном. Но измерение световыхода Nd-LS в маленьких объемах не является чувствительным методом для подтверждения стабильности сцинтиллятора, так как на маленьких объемах слабо сказывается изменение прозрачности сцинтиллятора.

Более чувствительным методом для определения стабильности Nd-LS является УФ-спектрофотометрический метод, который позволяет оценить изменение длины ослабления света сцинтиллятора. Надо сказать, что ионы неодима имеют много полос поглощения в УФ и видимой области, поэтому для оценки длины ослабления света бы-

Таблица 4. Световыход (LY, %) образцов сцинтилляторов

Образцы	№ канала	LY, %
ЛАБ + РРО (99%, Aldrich)	6136	100
ЛАБ + РРО (1992 г., партия 8)	5975	97
ЛАБ + ВРО	6544	107

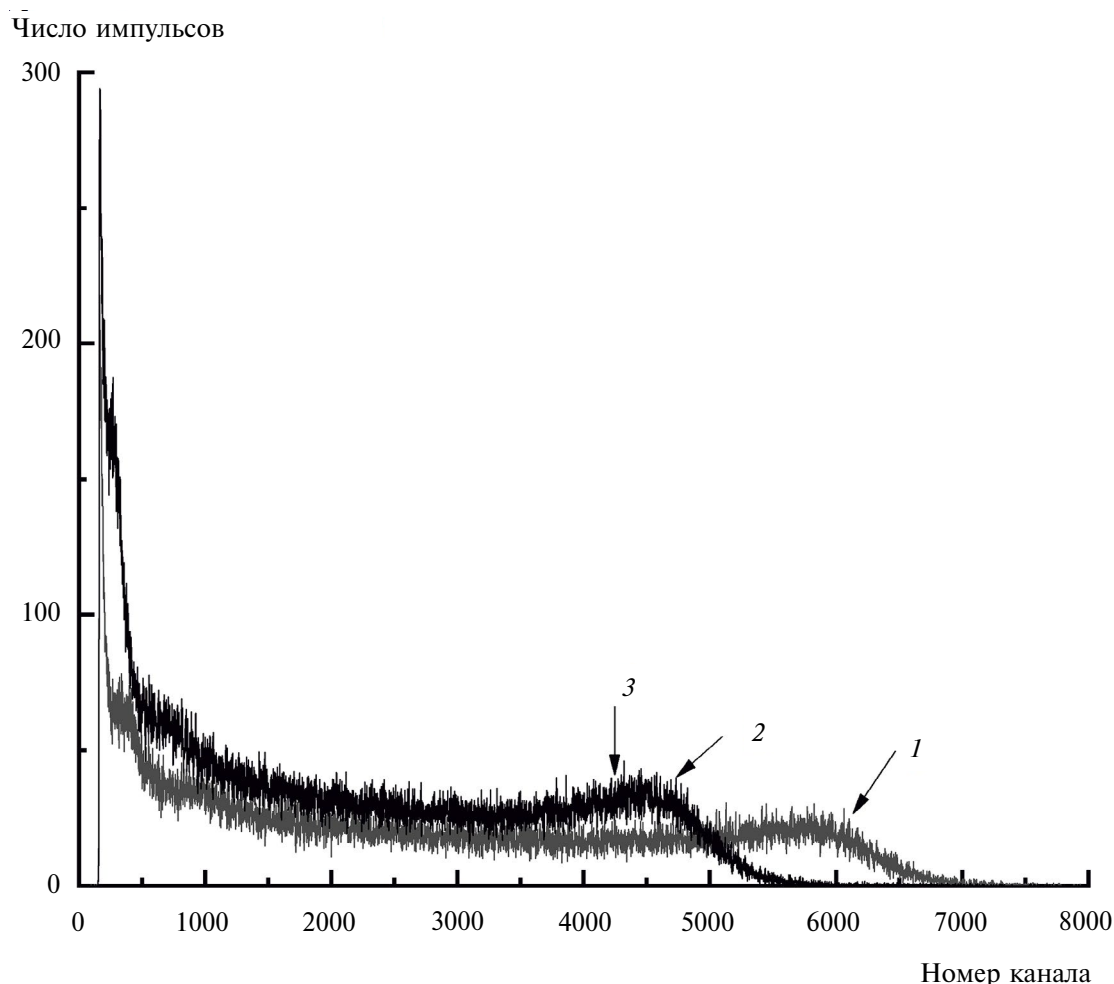


Рис. 7. Амплитудные спектры от ^{137}Cs (662 кэВ) в сцинтилляторах на основе ЛАБ:
 1 — ЛАБ + ВРО (3 г/л), 2 — Nd-LS (48 дней хранился под аргоном + 24 дня под воздухом), 3 — Nd-LS (72 дня хранился под воздухом).

Таблица 5. Световыход (LY, %) образцов Nd-LS

Образцы, дата отбора	Дата измерения	LY, %
ЛАБ + ВРО (3 г/л)		100
Nd-LS (10 сентября)	17 сентября	78
Nd-LS (10 сентября)	20 ноября	78
Nd-LS (28 октября)	20 ноября	78

ла выбрана область минимума между полосами поглощения неодима при 440 нм (см. рис. 8).

Из рис. 8 видно, что между полосами поглощения неодима (в области 400–440 нм) поглощение света в образце, который хранился под аргоном, меньше, чем у того, который все время хранился, контактируя с воздухом.

Увеличение поглощения света в образце сцинтиллятора при хранении под воздухом, вероятно, связано с образованием продуктов окисления

основного растворителя ЛАБ. На рис. 9 показаны спектры чистого ЛАБ, измеренного практически сразу после очистки и спустя 2 мес.

На рис. 9 заметно смещение спектра поглощения образца ЛАБ в длинноволновую область после его двухмесячного хранения на воздухе, что, очевидно, обусловлено добавлением полос поглощения продуктов окисления ЛАБ (гидропероксидов, ацетофенона, диметилфенилкарбинола (2-фенил-2-пропанола) и др., концентрация которых со време-

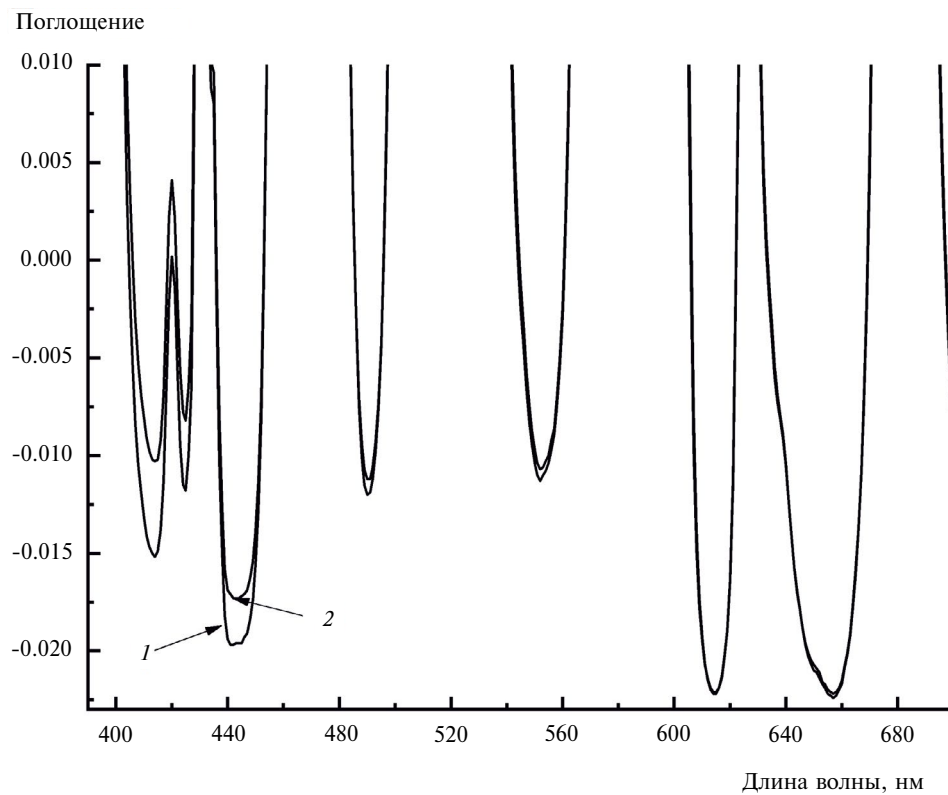


Рис. 8. УФ-спектры Nd-LS: 1 — образец, хранившийся под аргоном 48 дней, 2 — образец, хранившийся под воздухом более двух месяцев.

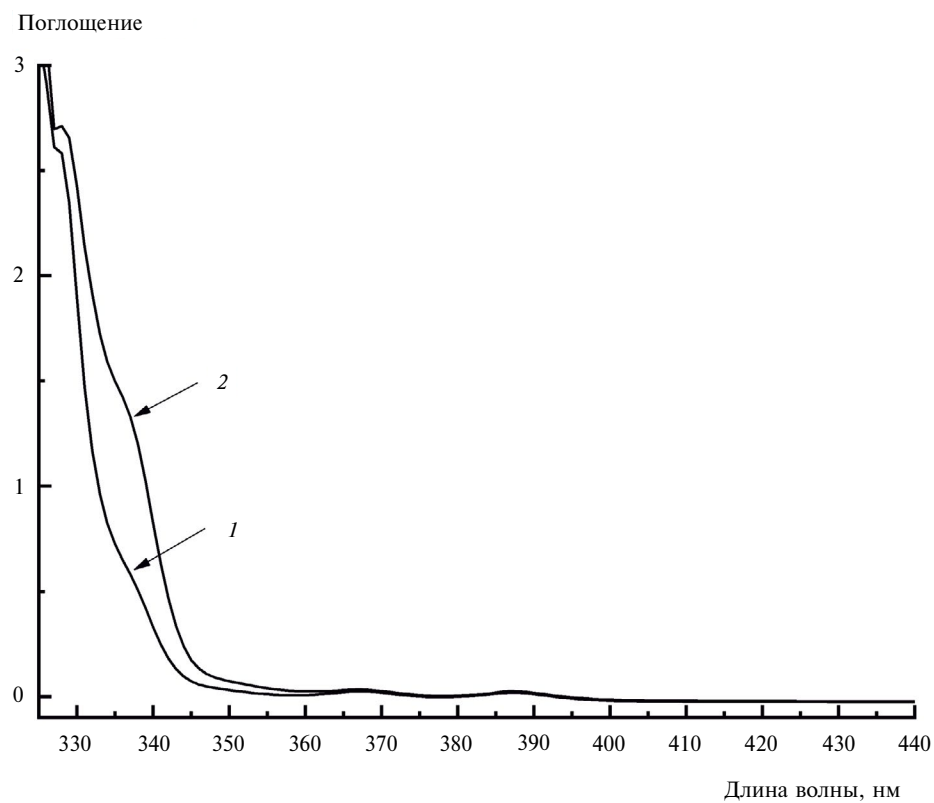


Рис. 9. УФ-спектры ЛАБ: 1 — ЛАБ, очищенный на Al_2O_3 (Fluka), 2 — ЛАБ после хранения под воздухом в течение двух месяцев.

нем возрастает. При этом карбоксилаты неодима, вероятно, могут служить катализаторами процессов окисления, подобно карбоксилатам гадолиния [24]. Однако нельзя исключать, что присутствие ТБФ в сцинтилляторе будет подавлять каталитические способности карбоксилатов лантаноидов, что требует дополнительных исследований.

Поэтому, как очищенный ЛАБ, так и сцинтиллятор на основе ЛАБ следует хранить в инертной атмосфере (под аргоном или азотом) и в темноте.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что при разработке оптимального состава Nd-LS особое внимание должно быть оказано подбору, очистке и хранению всех компонентов сцинтиллятора: основного и дополнительного растворителя, сцинтилляционных добавок, а также выбору соединения неодима, которому посвящена отдельная статья [9].

Показано, что наиболее чувствительным методом для оценки чистоты сцинтиллятора является УФ-спектрофотометрический, который позволяет оценить чистоту используемых компонентов и изменения, происходящие в сцинтилляторе, во время хранения. Также желательно готовить сцинтиллятор сразу после очистки всех компонентов и затем тут же продувать его чистым инертным газом — аргоном или азотом.

Разработанный метод введения карбоксилата неодима в сцинтиллятор с использованием предварительно полученного концентрата неодима в ТБФ ($C_{Nd} = 0.5$ моль/л) позволяет быстро адаптировать существующие нейтринные детекторы на основе чистого ЛАБ к использованию их для других целей (например, для поиска двойного безнейтринного бета-распада), для этого нужно будет только отобрать из них 6–10% сцинтиллятора и добавить соответствующее количество концентрата неодима в ТБФ. Вместо неодима можно использовать соединения других f-элементов, которые обладают похожими свойствами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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. А. С. Барабаш, УФН **184**, 524 (2014) [Phys. Usp. **57**, 482 (2014)].
2. C. L. Cowan, F. B. Harrison, L. M. Langer, and F. Reines, Nuovo Cimento **3**, 649 (1956); <https://doi.org/10.1007/BF02744440>
3. M. C. Chen for the SNO+ Collab., in *Proceedings of the 34th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2008), Philadelphia, Pennsylvania 30 Jul.–5 Aug. 2008*; arXiv: 0810.3694 [hep-ex].
4. Kai Zuber for the SNO+ Collab., AIP Conf. Proc. **942**, 101 (2007); <https://doi.org/10.1063/1.2805112>
5. C. Kraus for the SNO+ Collab., Prog. Part. Nucl. Phys. **57**, 150 (2006); <http://doi.org/10.1016/j.ppnp.2005.12.001>
6. J. Argyriades *et al.* (NEMO Collab.), Phys. Rev. C **80**, 032501(R) (2009); <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.80.032501>
7. A. R. Amiraslanova, Z. A. Akhmatov, I. R. Barabanov, A. V. Veresnikova, V. I. Gurentsov, A. M. Gangapshev, D. M. Kabardova, V. V. Kazalov, Z. Kh. Kalazhokov, A. A. Kanshaov, G. Ya. Novikova, D. A. Tekueva, M. Sh. Tk hazaplizhev, and E. A. Yanovich, Phys. At. Nucl. **87**, 784 (2024); <http://doi.org/10.1134/S106377882470073X>
8. I. Barabanov, L. Bezrukov, C. Cattadori, N. Danilov, A. Di Vacri, A. Ianni, S. Nisi, F. Ortica, A. Romani, C. Salvo, O. Smirnov, and E. Yanovich, arXiv: 0909.2152v1 [physics.ins-det].
9. И. Р. Барабанов, А. В. Вересникова, З. Ю. Исупова, Б. В. Локшин, В. П. Моргальюк, А. М. Немерюк, Г. Я. Новикова, С. А. Эльчепарова, Е. А. Янович, ЯФ **86**, 742 (2023) [Phys. At. Nucl. **86**, 1286 (2024)]; <https://doi.org/10.31857/S0044002723060132>
10. G. Ya. Novikova, V. P. Morgalyuk, and E. A. Yanovich, Russ. J. Inorg. Chem. **66**, 1161 (2021); <https://doi.org/10.1134/S0036023621080180>
11. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, A. V. Veresnikova, Yu. M. Gavriluk, V. I. Gurentsov, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, G. Ya. Novikova, S. V. Semenov, V. P. Sinev, G. O. Tsvetkov, and E. A. Yanovich, Phys. At. Nucl. **82**, 89 (2019); <https://doi.org/10.1134/S1063778819020029>
12. L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, E. A. Yanovich, A. I. Kostylev, N. A. Korsakova, E. K. Legin, A. E. Miroslavov, M. D. Karavan, B. V. Lokshin, and V. P. Morgalyuk, Russ. J. Inorg. Chem. **63**, 1564 (2018); <https://doi.org/10.1134/S0036023618120045>
13. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, and E. A. Yanovich, Phys. Part. Nucl. Lett. **15**, 630 (2018).
14. 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>
15. И. Р. Барабанов, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, Препринт ИЯИ РАН 1427/2016.
16. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, C. Cattadori, N. A. Danilov, A. Di Vacri, A. Ianni, S. Nisi, G. Ya. Novikova, F. Ortica, A. Romani, C. Salvo, O. Yu. Smirnov, and E. A. Yanovich, Instrum. Exp. Tech. **55**, 545 (2012).
17. I. B. Nemchenok, V. B. Brudanin, O. I. Kochetova, V. V. Timkin, and A. A. Shurenkova, Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. **75**, 1007 (2011); <https://doi.org/10.3103/S1062873811070288>
18. J. Hartnell for the SNO+ Collab., arXiv: 1201.6169v1 [physics.ins-det].

19. G. Ya. Novikova, A. M. Nemeryuk, V. P. Morgalyuk, A. A. Moiseeva, V. B. Lokshin, and E. A. Yanovich, *Russ. J. Inorg. Chem.* **69**, 1693 (2024).
20. The JUNO Collab., arXiv: 2103.16900v1 [physics.ins-det].
21. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, А. С. Чепурнов, Препринт ИЯИ РАН 1382/2014.
22. Н. И. Бакулина, Г. Я. Новикова, А. С. Редчин, Т. В. Бухаркина, С. В. Вержичинская, М. Г. Макаров, В. В. Зинченко, И. Ю. Кузнецов, *Химическая промышленность сегодня*, № 3, 38 (2018).
23. 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).
24. G. Ya. Novikova, M. V. Solovyova, and E. A. Yanovich, *ЯФ* **83**, 76 (2020); <http://doi.org/10.31857/S0044002720010109>
25. RENO Collab., arXiv: 1003.1391 [hep-ex].
26. W. Beriguete, J. Cao, Y. Ding, S. Hans, K. M. Heeger, L. Hu, A. Huang, K.-B. Lu, I. Nemchenok, M. Qi, R. Rosero, H. Sun, R. Wang, Yifand Wang, L. Wen, Yi Yang, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **763**, 82 (2014); <http://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.119>
27. 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).
28. 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, and S. Sukhotin, arXiv: 2112.09372 [physics.ins-det]; <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.09372>
29. H. Almaz 'an *et al.* (STEREO Collab.), *Phys. Rev. D* **102**, 052002 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.052002>
30. А. П. Серебров, В. Г. Ивочкин, Р. М. Самойлов, А. К. Фомин, В. Г. Зиновьев, С. С. Волков, В. Л. Головцов, Н. В. Грузинский, П. В. Неустроев, В. В. Федоров, И. В. Паршин, А. А. Герасимов, М. Е. Зайцев, М. Е. Чайковский, А. М. Гагарский, А. Л. Петелин и др., *ЖТФ* **93**, 175 (2023); <http://doi.org/10.21883/JTF.2023.01.54079.241-22>
31. P. K. Lightfoot, V. F. Kudryavtsev, N. J. C. Spooner, I. Liubarsky, R. Luscher, and N. J. T Smith, *Nucl. Instrum. Methods A* **522**, 439 (2004).
32. А. В. Карякин, Г. А. Кривенцова, *Состояние воды в органических и неорганических соединениях (по их ИК-спектрам поглощения)* (Наука, Москва, 1973).
33. C. Buck, F. X. Hartmann, D. Motta, and S. Schoenert, *Chem. Phys. Lett.* **435**, 252 (2007); <http://doi.org/10.1016/j.cplett.2006.12.087>
34. C. Buck, F. X. Hartmann, T. Lasserre, D. Motta, S. Schonert, and U. Schwan, *J. Lumin.* **106**, 57 (2004); [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(03\)00134-0](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(03)00134-0)

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF Nd-CONTAINING SCINTILLATOR TO INCREASE ITS LIGHT OUTPUT AND STABILITY

© 2025 A. V. Veresnikova^{1,2)}, Z. Yu. Isupova²⁾, B. V. Lokshin³⁾, V. P. Morgalyuk³⁾,
A. M. Nemeryuk⁴⁾, G. Ya. Novikova^{1,2)}, S. A. Elcheparova²⁾, 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*

⁴⁾*NRC "Kurchatov Institute" – IREA, Moscow, Russia*

Based on Nd(III) 3,5,5-trimethylhexanoate and an additional solvent TBP, the composition of a liquid organic scintillator for the determination of double neutrinoless β -decay was developed in LAB. IR spectroscopy has shown that TBP forms additional coordination bonds with neodymium carboxylate and thereby prevents its hydrolysis and polymerization. It has been shown that the optimal method for studying the purity and stability of a scintillator is UV spectrophotometry. The light yield of the scintillator composition [LAB + BPO (3 g/l) + TBP (6.3%) + Nd (5.9 \pm 0.2 g/l)] is 78% relative to the scintillator [LAB + BPO (3 g/l)].