

МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИЕ ЖИДКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕДКИХ СОБЫТИЙ. СВЕТОВОЙ ВЫХОД ПРИ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛА

© 2023 г. И. Р. Барабанов^{1),2)}, 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 21.06.2023 г.; после доработки 21.06.2023 г.; принята к публикации 22.06.2023 г.

Обсуждаются металлсодержащие жидкие органические сцинтилляторы (MeLS) с точки зрения светового выхода при высокой загрузке по металлу (Gd, Nd, Zr, In). Показано, что при введении в сцинтиллятор β -дикетонатов металлов его световой выход всегда оказывается ниже, чем при использовании их карбоксилатов, что объясняется структурным различием этих комплексов. Природа металла в некоторых случаях (Nd) влияет на длину ослабления света и, как следствие, на число собранных фотонов. Состав растворителя (доля ароматических соединений в основном растворителе) и степень очистки вводимого комплекса металла также оказывают существенное влияние на конечный световой выход.

DOI: 10.31857/S0044002723060132, EDN: ORXCKS

1. ВВЕДЕНИЕ

Элементсодержащие сцинтилляторы и, в частности металлсодержащие (MeLS) широко применяются в области нейтринной физики, начиная с первых экспериментов по регистрации антинейтринно с использованием кадмийсодержащего сцинтиллятора CdLS [1] и кончая экспериментами по поиску двойного безнейтринного β -распада, где в LS предложено вводить такие элементы, как ^{96}Zr [2, 3], ^{150}Nd [4–7], а также проектом по регистрации низкоэнергетичных солнечных нейтрино, в котором в качестве мишени рассматривается изотоп ^{115}In , имеющий высокое сечение и хорошую сигнатуру реакции с нейтрино [8, 9]. При этом введение в LS каждого нового элемента имеет свои особенности и свои трудности.

Большой опыт по созданию и применению MeLS накоплен при решении задач регистрации реакторных антинейтринно. В этом случае наиболее подходящим для введения в LS оказался Gd, который благодаря своим изотопам (^{157}Gd , ^{155}Gd) имеет более высокое сечение захвата

нейтрона, чем кадмий, использованный в первом антинейтринном детекторе [1]. Введение гадолиния в LS имеет свою историю, связанную, на наш взгляд, с тем, что первоначально химическим аспектам создания MeLS уделялось недостаточное внимание. Так, в одном из первых экспериментов по изучению осцилляций реакторных антинейтринно для введения в сцинтиллятор использовалась неорганическая соль гадолиния $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$, что в итоге привело к быстрой деградации GdLS в течение четырех месяцев (эксперимент CHOOZ [10]). В последующих аналогичных экспериментах использовались более устойчивые и хорошо растворимые в органических растворителях β -дикетонаты и карбоксилаты гадолиния, которые хорошо показали себя в экспериментах Double Chooz [11], RENO [12], Daya Bay [13], NEOS [14], и продолжают применяться в настоящее время в детекторах дистанционного мониторинга работы ядерного реактора [15] а также при проверке гипотезы “стерильных нейтрино” STEREO [16], Neutrino-4 [17].

Также следует отметить, что в случае применения GdLS для регистрации реакторных антинейтринно достаточно небольшой концентрации Gd 1–2 г/л в сцинтилляторе, и в этом случае не имеет большого значения, в виде какого соединения вводится гадолиний (карбоксилат или β -дикетонат).

Стабильность характеристик сцинтиллятора прежде всего будет зависеть от химической чистоты всех компонентов MeLS. Так, в экспериментах

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⁾НИИЦ “Курчатовский институт” — ИРЕА, Москва, Россия.

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

Таблица 1. Световыход сцинтилляторов с введенными β -дикетонатами металлов

β -дикетонаты металлов	Растворитель	C_{Me} , г/л	Fluors, г/л	C , г/л	LY, %
$In(AA)_3$	Анизол	47	ВРО*	100	51 [21]
			PPO	100	19 [21]
			PPO + bis-MSB**	100 + 0.5	35 [21]
$Zr(i-Prac)_4$	Анизол	13.6	PPO	50	48.7 [2]
$Zr(DPM)_4$	PC	5	ВРО	9	36 [3]
$Nd\{hfa\}_3 \cdot dme \cdot 0.25H_2O$	PC	6	ВРО	2	17 [5]
$Nd\{hfa\}_3 \cdot diglyme$	PC	4.5	ВРО	2	29 [5]

* ВРО: 2-фенил-5,4-бифенил-оксазол.

** bis-MSB: 1,4-bis(2-метилстирил)бензол.

RENO [13] и Daya Bay [18] (в обоих случаях был использован 3,5,5-триметилгексаноат гадолиния ($Gd(TMHA)_3$) и один и тот же растворитель — линейный алкилбензол (ЛАБ)) меньшая скорость деградации наблюдалась в Daya Bay, где большее внимание уделялось очистке всех компонентов сцинтиллятора (дистилляция растворителя и используемой для синтеза карбоновой кислоты, перекристаллизация 2,5-дифенилоксазола (PPO)). Хочется отметить также, что, как выяснилось [19], карбоксилаты гадолиния являются катализаторами окисления алкилбензолов кислородом воздуха. Поэтому особенно важна очистка растворителей от кислорода и первичных продуктов окисления ЛАБа; очевидно также, что для длительных экспериментов предпочтительнее использовать в качестве растворителей смесь, в которой алкилбензолы составляют лишь небольшую часть, а основными растворителями являются предельные углеводороды: додекан, МО (Минеральное масло), синтин [20], менее склонные к окислению.

Для регистрации редких событий (двойной безнейтринный β -распад, солнечные нейтрино) с использованием MeLS, чтобы иметь достаточно компактный детектор, необходимо добиваться максимально возможной концентрации элемента в органическом растворителе. В этом случае высокий световыход сцинтиллятора будет в значительной мере определяться структурой выбранного соединения металла, степени его очистки и растворителя.

2. ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОХОДА ОТ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЯ

Практика показывает, что для введения в сцинтиллятор металлов (Gd, Nd, Zr, In) наиболее подходящими оказались их соединения с разветвленными карбоновыми кислотами и β -дикетонами. (Несмотря на то, что сами карбоновые кислоты

и β -дикетоны относятся к органическим соединениям, их соли являются предметом изучения неорганической и по традиции элементоорганической химии, так как в них связь иона металла с органическими анионами осуществляется через кислород, как и в случае кислородсодержащих неорганических кислот. В истинных металлоорганических соединениях имеется непосредственная связь металла с углеродом органического остатка и такие соединения, как правило, неустойчивы и высокореакционно-способны).

Достоинством β -дикетонатов металлов является их высокая стабильность за счет хелатного эффекта, что делает возможным очистку путем возгонки при сравнительно невысоких температурах. Это их свойство прекрасно подходит для их очистки от аналогичных соединений U и Th, температура возгонки которых (вследствие большей молярной массы) значительно выше, что особенно важно для создания низкофоновых сцинтилляторов, необходимых для регистрации редких событий.

Однако при сравнении световыхода сцинтилляторов с введенными в них β -дикетонатами (см. табл. 1), видно, что при больших концентрациях по металлу для получения высокого световыхода требуется вводить сцинтилляционные добавки в очень высоких концентрациях.

Одно из объяснений этому явлению можно найти при сравнении УФ-спектров поглощения комплексов β -дикетонатов со спектрами поглощения сцинтилляционных добавок. β -дикетонаты металлов имеют очень высокие коэффициенты экстинкции, при этом максимумы их поглощения близки или совпадают с максимумами поглощения наиболее распространенных сцинтилляционных добавок. На рис. 1–3 представлены УФ-спектры поглощения 2,5-дифенилоксазола (PPO) (рис. 1) и β -дикетонатов Nd (рис. 2), и Zr (рис. 3) в гексане.

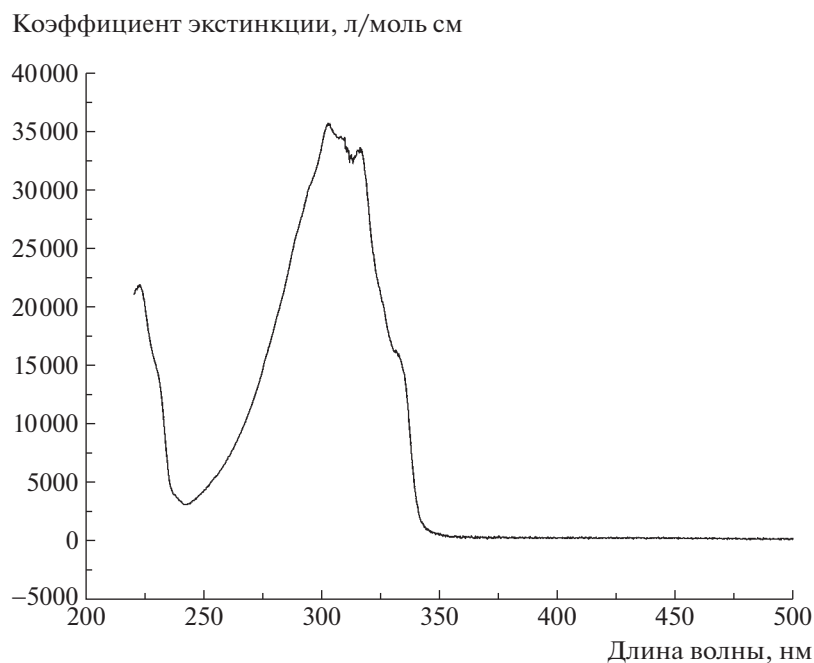


Рис. 1. УФ-спектр 2,5-дифенилоксазола (РРО) в гексане.

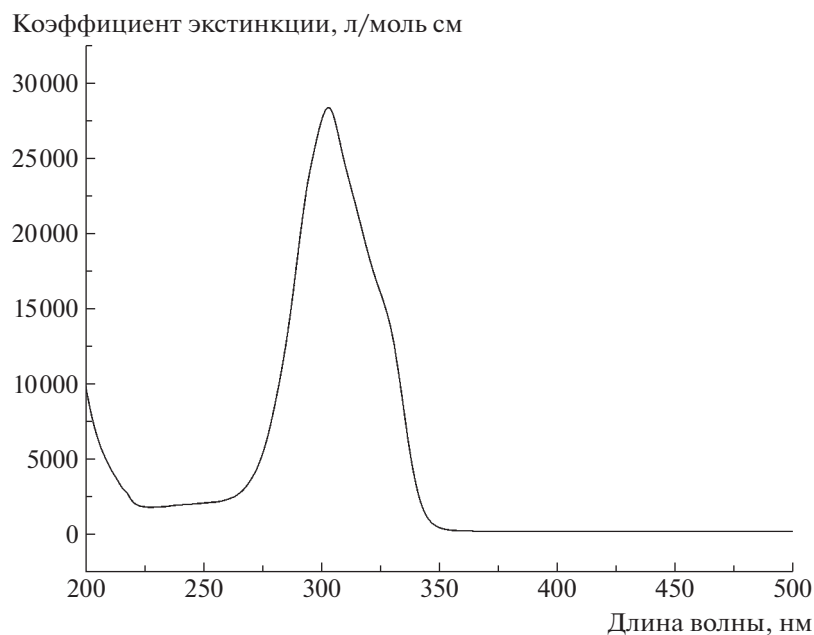


Рис. 2. УФ-спектр трис(1,1,1,5,5,5-гексафтор-2,4-пентандионато)(1,2-диметоксиэтан) неодима (III) ($\text{Nd}(\text{hfa})_3 \cdot \text{dme}$) в гексане.

Максимум поглощения РРО находится при 303 нм с коэффициентом экстинкции 37 500 (рис. 1). У комплекса Nd (гексафторацетилацетонат с добавкой dme, $\text{Nd}(\text{hfa})_3 \cdot \text{dme}$) (рис. 2) максимум поглощения также находится при 303 нм, а коэффициент экстинкции равен 28 000. У β -дикетоната Zr (дипивалоилметанат Zr) (рис. 3) коэффициент экстинкции также 28 000 с максимумом

поглощения при 285 нм. При той же длине волны находится максимум поглощения ацетилацетоната индия [21] с коэффициентом экстинкции 14 000. В то же время значения коэффициентов экстинкции карбоксилатов металлов примерно на три порядка меньше, чем у β -дикетонатов, а их максимумы поглощения сдвинуты в УФ-область (так, у 3,5,5-триметилгексаноата неодима ($\text{Nd}(\text{ТМНА})_3$),

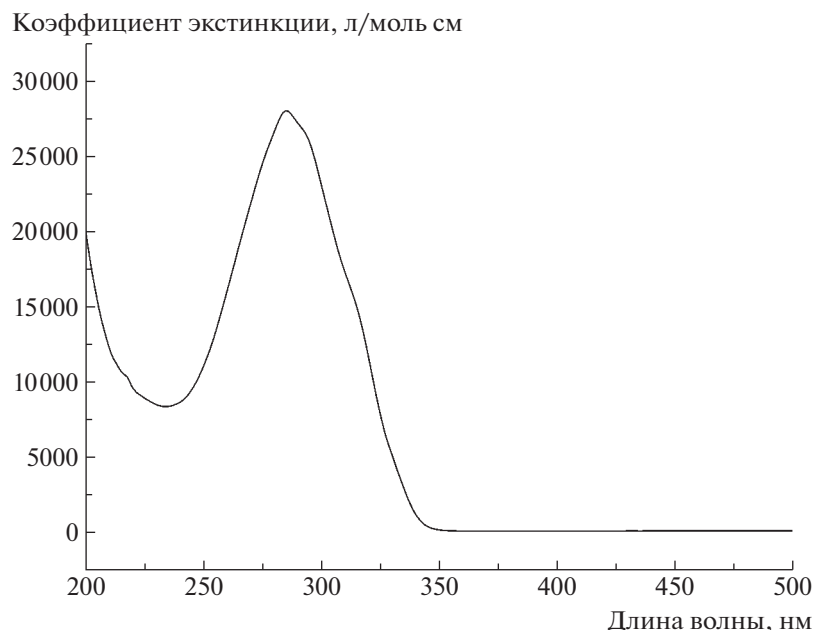


Рис. 3. УФ-спектр тетракис(2,2,6,6-тетраметил-3,5-гептандионата) циркония (IV) (дипивалоилметанат циркония), $Zr(DPM)_4$ в гексане.

коэффициент экстинкции составляет всего 26 в максимуме поглощения при 268 нм [22]).

На первый взгляд можно предположить, что β -дикетонаты конкурируют со сцинтилляционными добавками за перехват света от растворителя, но попытки использовать другие растворители и другие сцинтилляционные добавки, спектр испускания которых не перекрывается со спектром поглощения β -дикетонатов, не привели к значительному увеличению световыхода [21, 23].

Очевидно, что причина гашения света β -дикетонатными комплексами металлов кроется в самой их природе, а именно в структуре их молекул, возникающих при образовании прочного шестичленного хелата, в котором ион металла через связи с атомами кислорода β -дикетонатного остатка встроен в систему сопряженных связей, подобную бензолу (в отличие от карбоновых кислот, где оба кислорода связаны только с одним атомом углерода). В итоге возникает такая же устойчивая шестичленная структура, как и в случае ароматических углеводородов (только эта структура будет гетероатомная). Поэтому β -дикетонатные комплексы могут поглощать энергию возбуждения так же хорошо, как и ароматические молекулы, но в отличие от последних не переизлучают эту энергию далее в виде фотонов, а «гасят» ее внутри своего комплекса.

На настоящее время опубликовано много работ, где β -дикетонатные комплексы металлов используются для получения люминесцентных материалов, в которых энергия, поглощенная лигандным окружением комплексообразователя, пе-

редается металлу, высвечивающему ее затем в той или иной области. Но, как правило, высвечивание происходит не при тех длинах волн, где наиболее чувствительны современные ФЭУ, а самое главное, что этот эффект не проявляется в растворах. Однако авторы полагают, что следует выполнить синтетический поиск подобных люминесцентных материалов с нужными элементами и свойствами, подходящими для их использования в области ядерной физики.

3. ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ МЕТАЛЛА НА СВЕТОВОХОД

В разд. 2 при рассмотрении β -дикетонатных комплексов было показано, что природа металла и лиганда мало влияет на поглощение света этими комплексами.

Но природа металла все же может оказывать существенное влияние на длину ослабления света (наличие линий поглощения у иона металла) и, как следствие, на характеристики сцинтилляционного детектора. Так, при измерениях спектров поглощения карбоксилатов неодима и гадолиния наблюдается существенное отличие в их спектрах.

На рис. 4 показаны УФ-спектры поглощения 3,5,5-триметилгексаноатов неодима ($Nd(TMHA)_3$) и гадолиния ($Gd(TMHA)_3$) при одной и той же концентрации ($C = 0.005$ моль/л) в ЛАБ (Измерения проводились в 10 см-кюветах по отношению к кювете с воздухом).

Из рис. 4 видно, что, несмотря на то, что оба эти металла относятся к f -элементам, их УФ-спектры

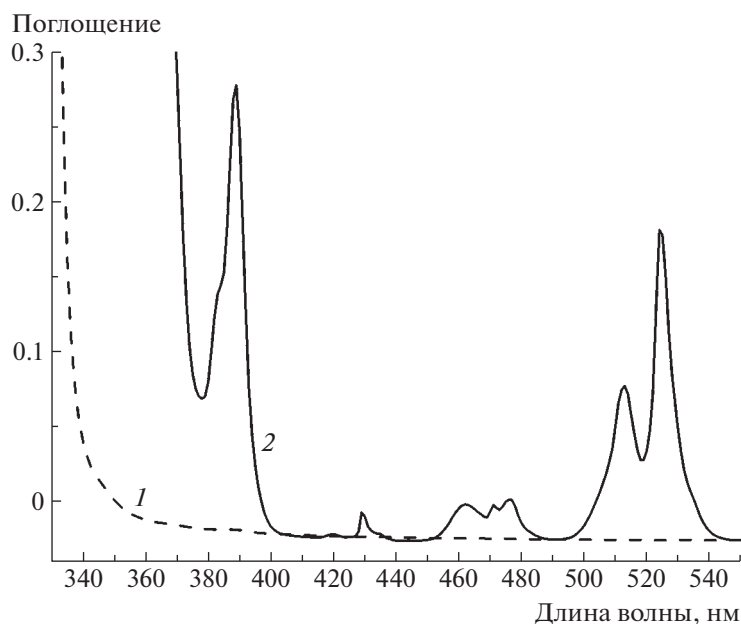


Рис. 4. УФ-спектры поглощения 0.005 М растворов 3,5,5-триметилгексаноата неодима ($\text{Nd}(\text{TMHA})_3$) (кривая 1) и гадолиния ($\text{Gd}(\text{TMHA})_3$) (кривая 2) в растворителе ЛАБ.

различаются. В отличие от спектра $\text{Gd}(\text{TMHA})_3$ в спектре $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ зарегистрировано много полос поглощения в УФ и видимой области спектра. Эти полосы поглощения относятся к иону неодима и будут проявляться во всех спектрах, независимо от типа соединения неодима и растворителя. Полосы поглощения неодима находятся в том числе в области наибольшей чувствительности ФЭУ (420–430 нм), поэтому для определения длины ослабления света NdLS практически нельзя использовать спектрофотометрический способ, который обычно применялся для оценки прозрачности новых растворителей [20, 24] или таких сцинтилляторов, как GdLS [25] и InLS [21].

Поэтому для NdLS больше подходит способ определения эффективной длины ослабления света, использованный в работе [6].

4. СИНТЕЗ 3,5,5-ТРИМЕТИЛГЕКСАНОАТА НЕОДИМА ($\text{Nd}(\text{TMHA})_3$)

Природа металла оказывает также влияние на выбор способа получения его карбоксилата. Так, для получения GdLS в проектах iDREAM [15] и Нейтрино-4 [17] применялась методика, разработанная в ИРЕА-Курчатовский центр. По этой методике синтезированный, промытый деионизированной водой и высушенный 3,5,5-триметилгексаноат гадолиния ($\text{Gd}(\text{TMHA})_3$) очищали при помощи промежуточного растворения в низкипящем растворителе тетрагидрофуране

(ТГФ), в котором он хорошо растворим. Далее раствор $\text{Gd}(\text{TMHA})_3$ в ТГФ пропускать через микропористый фильтр (для отделения нерастворимых продуктов гидролиза), после чего смешивался с ЛАБ с последующей отгонкой ТГФ в вакууме при невысокой температуре.

Однако при адаптации этой методики к созданию NdLS оказалось, что в этом случае ТГФ в качестве промежуточного растворителя для очистки $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ не подходит. В отличие от $\text{Gd}(\text{TMHA})_3$ аналогично полученный комплекс $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ не растворяется в ТГФ, а ведет себя совершенно по-другому. При добавлении ТГФ к $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ сразу же образуется мелкодисперсный осадок, который распространяется по всему объему ТГФ. $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ растворяется только в горячем ТГФ, но при охлаждении осадок выпадает вновь (в этом также сказывается отличие природы элемента Nd от Gd, объяснение этому пока не найдено).

Поэтому для создания NdLS в качестве промежуточного растворителя был использован диэтиловый эфир, в котором $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ хорошо растворяется.

Оба соединения (3,5,5-триметилгексаноаты гадолиния и неодима) растворимы также в углеводородах, алифатических или ароматических, однако для очистки значительных количеств предпочтительнее использовать в качестве растворителей простые эфиры, так как в них могут быть получены растворы высокой концентрации, вязкость которых позволяет осуществлять фильтрацию при

Таблица 2. Световой выход сцинтиллятора (LY) в зависимости от растворителя

Растворитель	PPO, г/л	Bis-MSB, г/л	LY, %
ЛАБ	5	0.04	100
РС	5	0.04	133
Dip	5	0.04	138
ЛАБ + Dip (10%)	5	0.04	108
ЛАБ + нафталин (10%)	5	0.04	95
Синтин (C ₁₃ H ₂₈ –C ₁₈ H ₃₈)	5	0.04	46
Синтин + нафталин (10%)	5	0.04	76

значениях избыточного давления, не превышающих 2–4 атм, тогда как растворы в углеводородах отличаются высокой вязкостью даже при невысоком содержании карбоксилатов.

Методика, разработанная для получения GdLS в лабораторных условиях [26], подошла и для получения NdLS практически без всяких изменений. По этой методике синтез Nd(ТМНА)₃ осуществлялся при мольном соотношении Nd и карбоновой кислоты, равном 1 : 4, а Nd и аммиака — равном 1 : 3 (избыток кислоты в 1 моль по отношению к стехиометрическому брался для поддержания значений pH, близких к 7, что важно для высокого выхода). После синтеза Nd(ТМНА)₃ трижды промывался деионизированной водой, а затем промывался еще спиртом и ацетоном для удаления воды. Просушенная соль затем растворялась в основном растворителе и на конечном этапе пропускалась через микропористый фильтр с диаметром пор 0.05 мкр.

В силу высокой парамагнитности катиона Nd³⁺ зарегистрировать спектры ¹H ЯМР Nd(ТМНА)₃ не удалось. Поэтому для анализа образцов Nd(ТМНА)₃ использовался метод ИК-спектроскопии. Были проанализированы образцы, полученные по обоим методикам, трижды промытые водой и высушенные в вакуумном сушильном шкафу над кристаллическим КОН. А также образец, полученный и высушенный по методике ИРЕА, а потом перекристаллизованный из горячего ТГФ, и образец, полученный по методике ИЯИ РАН, трижды промытый водой, спиртом и ацетоном и высушенный аналогичным способом.

ИК-спектры измерены на ИК-Фурье спектрометре VERTEX 70v методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием адаптера Pike Glady ATR на базе кристалла алмаза в диапазоне 4000–400 см⁻¹. Спектры образцов измерены непосредственно от порошка без предварительной подготовки. Измеренные спектры

НПВО подвергнуты коррекции с использованием программы OPUS 7 для учета зависимости глубины проникновения излучения в образец от длины волны.

ИК-спектры, полученные для всех четырех исследованных образцов, оказались практически идентичными. Поэтому на рис. 5 приводится только один ИК-спектр для образца, полученного по методике ИРЕА, трижды промытого деионизированной водой и высушенного в вакуумном шкафу над КОН.

ИК-спектр, представленный на рис. 5, содержит характеристичные полосы поглощения всех групп, входящих в состав Nd(ТМНА)₃. Наиболее характерными для солей карбоновых кислот являются полосы поглощения, соответствующие асимметричному и симметричному колебаниям депротонированной карбоксильной группы в области 1650–1510 см⁻¹ и 1440–1370 см⁻¹ соответственно [27] (в нашем случае это 1534 см⁻¹ и 1406 см⁻¹).

Как известно [27], значение разности частот асимметричного и симметричного колебаний карбоксильной группы –ОСО– может служить для определения возможного способа ее координации с металлом-комплексобразователем в комплексном соединении. Если значение разности меньше 220 см⁻¹, то карбоксильная группа координируется бидентатно, если больше — монодентатно. В нашем случае разность равна 128, и мы имеем бидентатную координацию карбоксильной группы.

Кроме того, на ИК-спектре отсутствуют полосы поглощения в области 3000–3600 см⁻¹, что указывает на отсутствие в нем следов воды, что очень важно для использования этой соли при создании NdLS.

5. ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТОВОХОДА ОТ РАСТВОРИТЕЛЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ВВЕДЕННОГО МЕТАЛЛА

Ранее [20] авторы показали, что существует некоторая корреляция между мольной концентрацией ароматических соединений в растворителе и световым выходом сцинтиллятора при постоянной концентрации сцинтилляционных добавок. Было показано также, что световой выход предельных углеводородов (в частности, синтина) может быть увеличен при добавлении в него ароматических углеводородов. В предлагаемой работе такие исследования были продолжены. Показано (рис. 6), что световой выход синтина зависит от его объемной доли в смеси с ЛАБ. Световой выход сцинтиллятора измерялся с помощью радиоактивного источника ¹³⁷Cs по методике, описанной ранее [7]. Рассчитывалась относительная величина световых выходов, т.е.

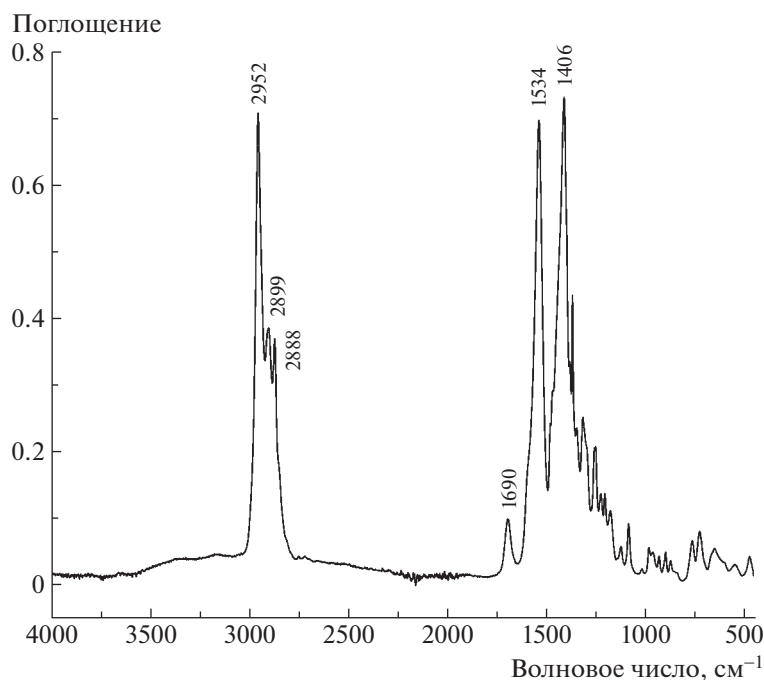


Рис. 5. ИК-спектр $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$, синтезированного по методике ИРЕА, после трехкратной промывки деионизированной водой и просушки в вакуумном сушильном шкафу над КОН.

процентное отношение световыхода сцинтиллятора с введенным соединением к световыходу сцинтиллятора с чистым растворителем при одинаковой концентрации сцинтилляционной добавки.

Из рис. 6 следует, что хороший световыход 80% достигается в смеси синтин–ЛАБ, содержащей 60% синтина и 40% ЛАБа (по объему). Также было показано, что близкий световыход в синтине (76%) может быть достигнут при растворении в нем 10 массовых % нафталина (см. табл. 2).

Из табл. 2 видно, что псевдокумол (РС) и диизопропилнафталин (Dip) имеют более высокий световыход по сравнению с чистым ЛАБ, световыход которого принят за 100%. Но при добавлении Dip (10% по объему) световыход ЛАБ увеличивается незначительно. При добавлении нафталина световыход ЛАБ практически не изменяется (в пределах ошибки измерения 5%). Однако при добавлении нафталина к синтину (смеси предельных углеводородов линейного строения) его световыход увеличивается на 65%, но не достигает значения световыхода сцинтиллятора на основе чистого ЛАБ.

Таким образом, сочетание предельных углеводородов с нафталином имеет смысл только с точки зрения стабильности MeLS при длительном использовании сцинтилляционного детектора, так как предельные углеводороды практически не подвержены процессам окисления при нормальных условиях.

Кроме того, было показано, что влияние карбоксилата неодима на световыход сцинтиллятора также зависит от выбора растворителя.

На рис. 7 показана зависимость световыхода от концентрации Nd (в виде $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$) в сцинтилляторе на основе ЛАБ. На рис. 8 такая же зависимость показана при использовании в качестве растворителя псевдокумола. При этом на рис. 8 верхняя кривая относится к просушенной соли $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$, а нижняя — к непросушенной. Оказалось, что световыход MeLS зависит также от способа ввода соли Nd в сцинтиллятор: растворением твердой высушенной соли или растворением соли, только промытой водой (Daya Bay [13]), или введенной в сцинтиллятор методом экстракции, как это было сделано, например, в экспериментах RENO [12], NEOS [14].

Из сравнения рис. 7 и 8 (верхняя кривая) видно, что световыход сцинтиллятора при введении просушенного $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ выше в случае использования в качестве растворителя псевдокумола по сравнению с использованием ЛАБ. Для NdLS с содержанием неодима 6 г/л в случае ЛАБ световыход равен 70%, а при использовании псевдокумола — 90%.

При сравнении световыхода сцинтиллятора с просушенной и непросушенной солью (рис. 8) видно, что при введении в сцинтиллятор высушенной соли его световыход выше, чем при использовании соли, растворенной в псевдокумоле сразу же после промывки (водой, спиртом и ацетоном). При

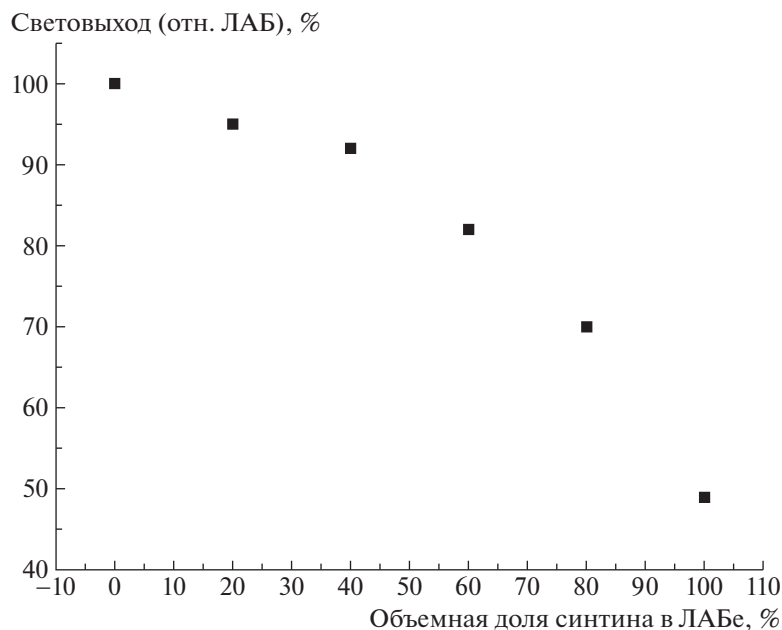
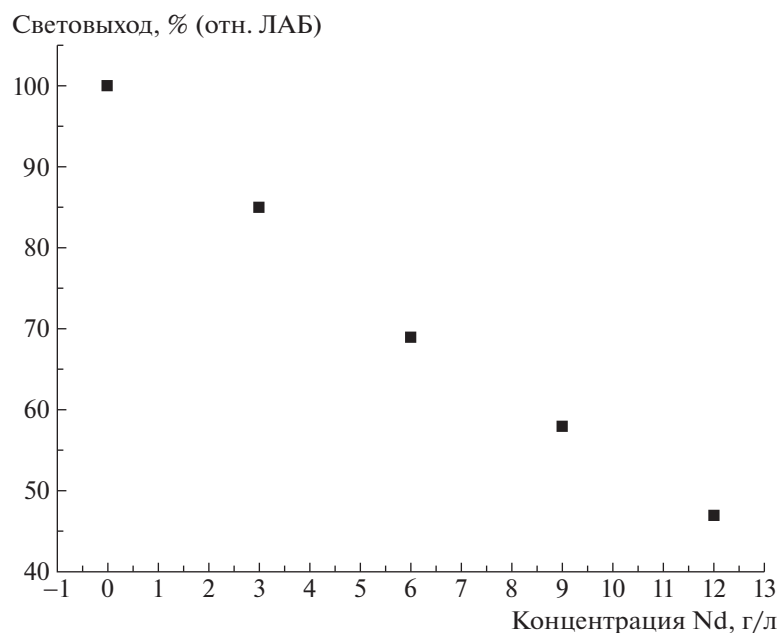


Рис. 6. Зависимость световыхода от объемной доли синтина в ЛАБ.

Рис. 7. Зависимость световыхода от концентрации Nd в сцинтилляторе на основе ЛАБ. Соединение — $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$.

высоком содержании Nd ($C = 33$ г/л) в случае использования просушенного $\text{Nd}(\text{TMHA})_3$ световыход равен 61%, а в случае непросушенного — всего 28%.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, авторы показали, что по сравнению с карбоксилатами β -дикетонаты металлов демонстрируют более сильное гашение света в

сцинтилляторах независимо от природы металла, входящего в их состав.

Однако природа металла все же имеет значение. Несмотря на то что Nd и Gd относятся к одному семейству f -элементов, их спектральные свойства различаются. Наличие собственных полос поглощения у иона неодима в УФ и видимой области ведет к дополнительному поглощению света, что сказывается на длине ослабления света и, как следствие, на числе собранных фотонов.

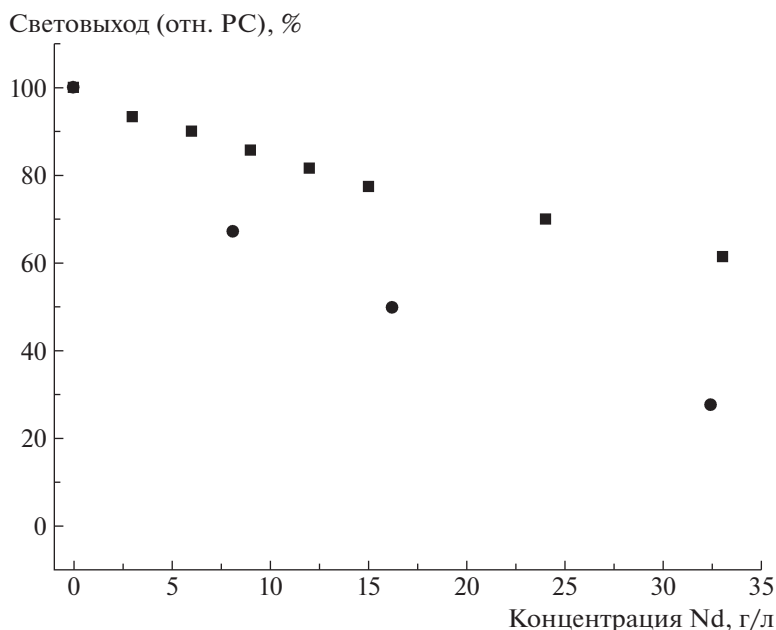


Рис. 8. Зависимость световыхода от концентрации Nd в сцинтилляторе на основе псевдокумола. Верхняя кривая — соль $\text{Nd}(\text{ТМНА})_3$, просушенная под вакуумом над КОН, нижняя кривая — соль $\text{Nd}(\text{ТМНА})_3$, растворенная сразу после промывки.

Световыход сцинтиллятора (как не содержащего металл, так и в форме MeLS) в большой мере зависит от выбора растворителя (в частности, от концентрации ароматических углеводородов в его составе). Световыход NdLS (при введении Nd в форме $\text{Nd}(\text{ТМНА})_3$) выше при использовании в качестве основного растворителя псевдокумола по сравнению с ЛАБ.

Также световыход MeLS зависит от способа введения элементсодержащего соединения в сцинтиллятор (в виде твердой высушенной соли, в виде непросушенной или способом экстракции). Больший световыход получается при использовании твердого просушенного карбоксилата металла.

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. F. Reines and C. L. Cowan, Jr., *Phys. Rev.* **90**, 492 (1953); **92**, 830 (1953).
2. Y. Fucuda, S. Moriyama, K. Hiraide, I. Ogawa, T. Gunji, R. Hayami, S. Tsukadaw, and S. Kurosawa, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1468**, 012139 (2020); <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1468/1/012139>
3. L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, E. A. Yanovich, B. V. Lokshin, V. P. Morgalyuk, A. I. Kostylev, and N. A. Korsakova, *Russ. J. Inorg. Chem.* **66**, 421 (2021); <https://doi.org/10.1134/S0036023621030037>
4. 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. V. Sinev, G. O. Tsvetkov, and E. A. Yanovich, *Phys. Part. Nucl.* **82**, 89 (2019); <https://doi.org/10.1134/S1063778819020029>
5. 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>
6. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, G. Ya. Novikova, and E. A. Yanovich, *Phys. Part. Nucl. Lett.* **15**, 630 (2018).
7. 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>
8. Z. Chang, J. Benziger, A. Garnov, C. Grieb, R. L. Hahn, R. S. Raghavan, and M. Yeh, *Nucl. Phys. B* **221**, 337 (2011); <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2011.09.036>
9. I. R. Barabanov, L. B. Bezrukov, V. I. Gurentsov, G. Ya. Novikova, V. V. Sinev, and E. A. Yanovich, *Phys. At. Nucl.* **85**, 402 (2022); <https://doi.org/10.1134/S1063778822040056>
10. M. Apollonio, A. Baldini, and C. Bemporad, *Phys. Lett. B* **420**, 397 (1998); [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(97\)01476-7](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(97)01476-7)

11. C. Aberle, C. Buck, B. Gramish, F. X. Hartmann, M. Lindner, S. Schönert, U. Schwan, S. Wagner, and H. Watanabe, *JINST* **7**, 06008 (2012); <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/06/P06008>
12. H. S. Kim *et al.* (RENO Collab.), *Part. Phys. Pros.* **265**, 93 (2015).
13. S. H. Kim *et al.* (RENO Collab.), arXiv: 1609.09483v1 [physics.ins-det].
14. Y. J. Ko *et al.* (NEOS Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 121802 (2017).
15. A. Abramov, A. Chepurinov, 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>
16. H. Almazán *et al.* (STEREO Collab.), *Phys. Rev. D* **102**, 052002 (2020); <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.052002>
17. 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. Неустоев, В. В. Федоров, И. В. Паршин, А. А. Герасимов, М. Е. Зайцев, М. Е. Чайковский, А. М. Гагарский, А. Л. Петлин и др., *ЖТФ* **93**, 175 (2023); <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.01.54079.241-22>
18. W. Beriguete, J. Cao, Y. Ding, S. Hans, K. M. Heeger, L. Hu, A. Huang, K.-B. Luk, I. Nemchenok, M. Qi, R. Rosero, H. Sun, R. Wang, Y. Wang, L. Wen, Y. Yang, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods A* **763**, 82 (2014); <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.05.119>
19. G. Ya. Novikova, M. V. Solovyova, and E. A. Yanovich, *Phys. At. Nucl.* **83**, 75 (2020); <https://doi.org/10.31857/S0044002720010109>
20. И. Р. Барабанов, А. В. Вересникова, А. А. Моисеева, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, Е. А. Янович, *ЯФ* **86**, 310 (2023); <https://doi.org/10.31857/S0044002723020034>
21. C. Buck, F. X. Hartmann, T. Lasserre, D. Motta, S. Schönert, 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)
22. G. Ya. Novikova, V. P. Morgalyuk, and E. A. Yanovich, *Russ. J. Inorg. Chem.* **66**, 1161 (2021); <https://doi.org/10.31857/S0044457X21080183>
23. Y. Fukuda, S. Moriyama, and I. Ogawa, *Nucl. Instrum. Methods A* **732**, 397 (2013); <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.06/043>
24. Л. Б. Безруков, Н. И. Бакулина, Н. С. Иконников, В. П. Моргалюк, Г. Я. Новикова, А. С. Чепурнов, Препринт ИЯИ РАН 1382/2014 (апрель 2014).
25. G. Ya. Novikova, N. I. Bakulina, and V. P. Morgalyuk, *Russ. J. Inorg. Chem.* **59**, 389 (2014); <https://doi.org/10.1134/S0036023614030164>
26. Г. Я. Новикова, Н. И. Бакулина, А. В. Воложанина, Б. В. Локшин, В. П. Моргалюк, *ЖНХ* **61**, 270 (2016) [*Russ. J. Inorg. Chem.* **61**, 257 (2016)]; <https://doi.org/10.7868/S0044457X1602015X>
27. К. Накамото, *Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений* (Мир, Москва, 1991).

METAL-LOADING LIQUID ORGANIC SCINTILLATORS FOR RECORDING RARE EVENTS. LIGHT YIELD AT HIGH METAL CONCENTRATION

I. R. Barabanov^{1),2)}, A. V. Veresnikova^{1),2)}, Z. Yi. 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 the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

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

Metal-loading liquid organic scintillators (MeLS) are discussed from the point of view of light output at high metal loading (Gd, Nd, Zr, In). It has been shown that when metal beta-diketonates are introduced into the scintillator, its light output is always lower than when carboxylates are used, which is explained by the structural difference between these complexes. The nature of the metal in some cases (Nd) also affects the light attenuation length and, consequently, the MeLS light output. The composition of the solvent (the fraction of aromatics in the main solvent) and the degree of purification of the introduced metal complex also have a significant effect on the light output.