

*И.Б. Немченко*

---

***Органические сцинтилляторы для  
физики высоких энергий: пути повышения  
эффективности регистрации***



*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна*

---

# Органические сцинтилляторы



## **Достоинства ЖС и ПС:**

- быстрое действие;
- повышенная радиационная стойкость;
- простота создания детекторов любой формы и конфигурации;
- возможность создания детекторов больших размеров;
- относительно низкая стоимость;
- возможность простых способов очистки от радиоактивных загрязнений.

## **ЖС+:**

- высокая прозрачность к собственному излучению;
- возможность идентификации частиц по форме импульса.

## **ПС+:**

- пожаробезопасность;
- нетоксичность.

# Органические сцинтилляторы

**Эффективность  
регистрации ЯИ**

*(вероятность регистрации частицы при попадании в рабочий объем детектора)*



**Световыход**

*(количество фотонов, излучаемых сцинтиллятором при поглощении определенного количества энергии)*



*Абстрагируясь от конструкции детектора и условий измерения, можно утверждать:*

**эффективность  
регистрации и световыход –  
функции материала  
детектора.**

# Органические сцинтилляторы

## **Механизм акта радиолюминесценции [1]:**

- передача энергии налетающей частицы на возбуждение атомов и молекул и на образование вторичных частиц, вызывающих, в свою очередь, ионизацию и возбуждение;
- перенос энергии от возбужденных или ионизированных частиц к непосредственно высвечивающим центрам (атомам, ионам, молекулам или более сложным комплексам);
- испускание света сцинтилляции высвечивающим центром.

## **ОС обычного состава (основное вещество и люминесцентные добавки) чувствительны к:**

- заряженным частицам:
  - электронам;
  - протонам;
  - $\alpha$ -частицам;
  - мюонам космических лучей и др;
- быстрым нейтронам.

Эффективность регистрации  $\gamma$ - и рентгеновских квантов невелика.

**Молекулярный характер  
люминесценции ОС**

**ЖС ++ и ПС ++:  
возможность коррекции  
элементного состава**

**Элементосодержащие  
органические  
сцинтилляторы (ЭОС)**

# Элементосодержащие органические сцинтилляторы (ЭОС)

<b>Элементы или изотопы</b>	<b>Области применения</b>
${}^6\text{Li}$ , ${}^{10}\text{B}$ , ${}^{113}\text{Cd}$ , ${}^{155}\text{Gd}$ , ${}^{157}\text{Gd}$ , ${}^{235}\text{U}$	Всеволновые детекторы нейтронов, наблюдение нейтринных осцилляций
${}^{176}\text{Yb}$ , ${}^{160}\text{Gd}$ , ${}^{115}\text{In}$ , ${}^{100}\text{Mo}$ , ${}^{37}\text{Cl}$	Детектирование солнечных нейтрино
$\text{Pb}$	Детектирование астрофизических нейтрино
${}^{150}\text{Nd}$ , ${}^{160}\text{Gd}$ , ${}^{100}\text{Mo}$ , ${}^{130}\text{Te}$ , ${}^{82}\text{Se}$	Поиск двойного $\beta$ -распада
$\text{Pb}$ , $\text{Sn}$ , $\text{W}$ , $\text{Hg}$ , $\text{Bi}$	Калориметры полного поглощения, дозиметрия рентгеновского и $\gamma$ -излучения

# Элементосодержащие органические сцинтилляторы (ЭОС)

---

## **Методы получения:**

- подбор элементосодержащих добавок (солей, комплексных и элементоорганических соединений) с достаточной растворимостью в традиционных сцинтилляционных материалах ;
- поиск новых, в том числе и многокомпонентных, сцинтилляционных основ;
- получение ЭОС на основе микрогетерогенных и коллоидных систем.

## **Требования к элементосодержащим добавкам:**

- оптическая прозрачность в диапазоне 300 - 600 нм;
- термическая устойчивость;
- устойчивость к атмосферному кислороду;
- устойчивость к гидролизу;
- радиационная стабильность;
- фотоустойчивость.

# Элементосодержащие органические сцинтилляторы (ЭОС)

Элемент	Элементосодержащие добавки
<b>B</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Триметилборат (ЖС).</li><li>2. Метаборат, тетраборат и тетрафтороборат лития (ПС).</li><li>3. N,N,N-Триметилборазол (ЖС).</li><li>4. о-Карборан (ЖС, ПС) и изопропенил-о-карборан (ПС).</li><li>5. Декаборан и аллилдекаборан (ПС).</li></ol>
<b>Cd</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Пропионат кадмия (ЖС).</li><li>2. Хлорид кадмия (ЖС).</li><li>3. Комплексное соединение хлорида кадмия с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты (ПС).</li></ol>
<b>Li</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Хлорид лития (ЖС).</li><li>2. Пропионат лития (ЖС).</li><li>3. Метилат лития (ЖС).</li><li>4. Салицилат лития (ЖС, ПС).</li><li>5. Фосфат лития (ЖС).</li></ol>
<b>In</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Триметилгексаноат, 2-метилвалерат и другие карбоксилаты индия (ЖС).</li><li>2. Трифторацетат индия (ЖС).</li><li>3. Хлорид индия (ЖС).</li><li>4. Ацетилацетонат индия (ЖС).</li></ol>
<b>Yb</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 2-Метилгексаноат иттербия (ЖС).</li><li>2. Хлорид иттербия (ЖС).</li></ol>
<b>Gd</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Нитрат гадолиния (ЖС).</li><li>2. Дипивалоилметанат гадолиния (ЖС).</li><li>3. 3,5,5-Триметилгексаноат и другие карбоксилаты гадолиния (ЖС).</li><li>4. Ацетилацетонат гадолиния (ЖС).</li><li>5. Комплексное соединение нитрата гадолиния с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты (ПС).</li></ol>
<b>Nd</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 4-Метиоктаноат неодима (ЖС) и 3,5,5-триметилгексаноат неодима (ЖС, ПС).</li><li>2. Комплексное соединение хлорида неодима с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты (ПС).</li></ol>
<b>Sn, Hg, Pb, Bi, As</b>	Тетраметил-, тетрабутил- и тетрафенилолово; дифенилртуть; тетрафенилсвинец; трифенилвисмут; трифенилмышьяк (ЖС, ПС).

# ЭОС для регистрации тепловых нейтронов

## Регистрация нейтронов ОС «обычного состава»

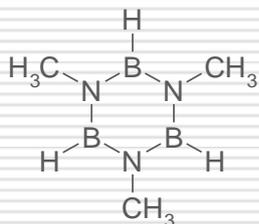
<b>Энергия нейтрона</b>	<b>Процесс</b>
100 кэВ ÷ 10 МэВ	Упругое рассеяние на протонах с образованием протонов отдачи
> 10 МэВ	Взаимодействие с ядрами углерода
< 100 кэВ	Замедление до 0,5 эВ с последующим взаимодействием с протонами $n + p \longrightarrow d + \gamma$

# ЭОС для регистрации тепловых нейтронов

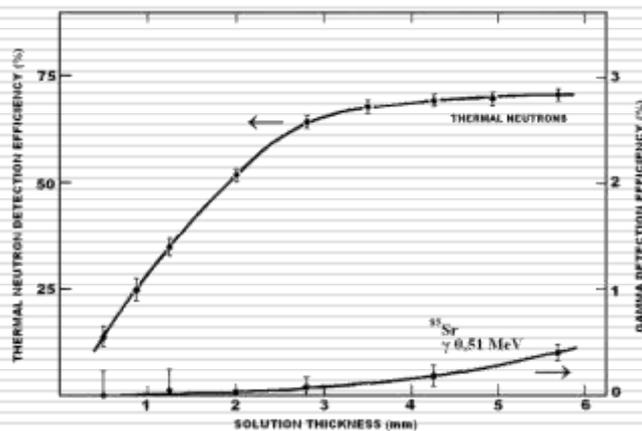
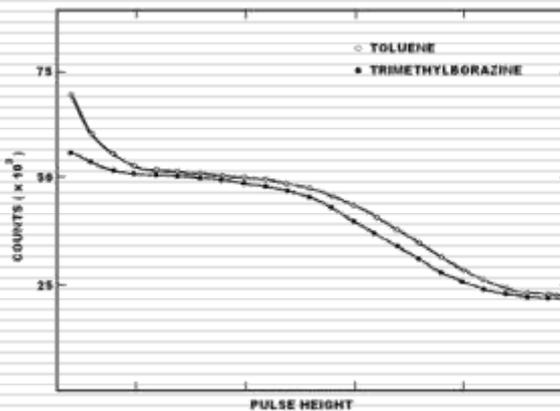
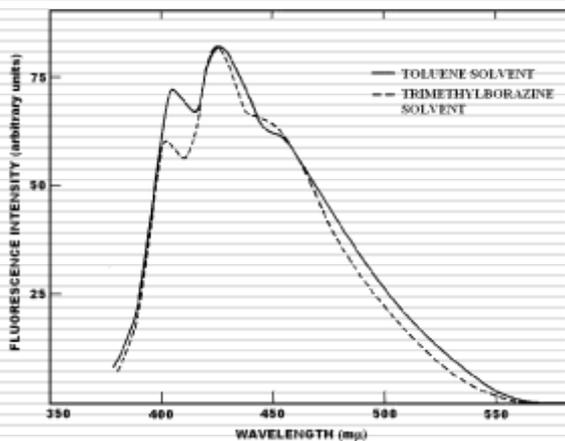
Изотоп	Содержание в естественной смеси	Реакция	Сечение захвата, барн	Регистрируемые частицы
$^{235}\text{U}$	0,007	Деление	$5,8 \times 10^2$	Продукты деления: $\cong 200$ МэВ
$^6\text{Li}$	0,075	$(n, \alpha)$	$9,4 \times 10^2$	$\alpha$ : 2,05 МэВ + $^3\text{H}$ : 2,73 МэВ
$^{10}\text{B}$	0,20	$(n, \alpha)$	$3,8 \times 10^3$	$\alpha$ : 1,47 МэВ + $^7\text{Li}$ : 0,84 МэВ + $\gamma$ : 0,48 МэВ
$^3\text{He}$	$10^{-4}$	$(n, p)$	$5,3 \times 10^3$	$p$ : 0,574 МэВ + $^3\text{H}$ : 0,191 МэВ
$^{113}\text{Cd}$	0,12	$(n, \gamma)$	$2,0 \times 10^4$	$\gamma$ -каскад: до 8 МэВ
$^{155}\text{Gd}$	0,15	$(n, \gamma)$	$6,1 \times 10^4$	$\gamma$ -каскад: до 8 МэВ
$^{157}\text{Gd}$	0,16	$(n, \gamma)$	$2,6 \times 10^5$	$\gamma$ -каскад: до 8 МэВ



# В-содержащие ЖС



*N,N,N-триметилборазин [14]*



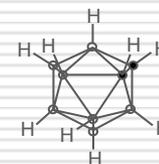
## Растворитель



$$R = C_nH_{2n-1}, \text{ где } n = 7 - 12$$

линейный алкилбензол

## В-содержащая добавка



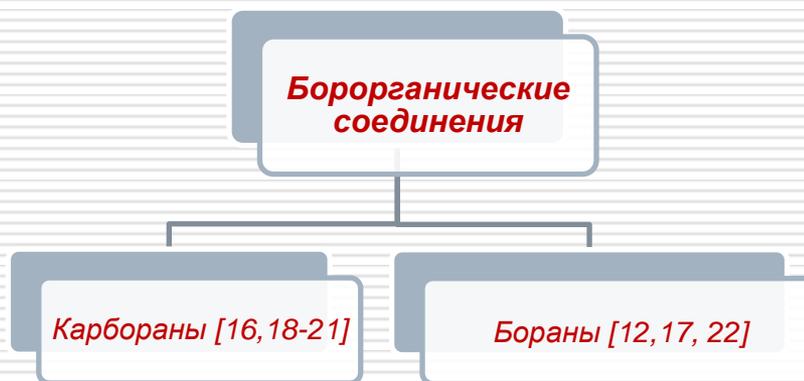
*о-карборан*

# В-содержащие ПС

**Литиевые соли борных кислот:**  $\text{LiBO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{LiBF}_4$  [15]

**Недостаток:** гетерогенность → низкая прозрачность к собственному излучению.

## Современный этап



12. [www.detectors.saint-gobain.com](http://www.detectors.saint-gobain.com)

15. Барони Е.Е., Викторов Д.В., Розман И.М., Шоня В.М. // *Nucl. Electronics*, 1962, V.1, p. 131.

16. Анисимова Г.И., Данелян Л.С., Жигач А.Ф., Лазаренко В.Р., Сирятская В.Н., Сорокин П.З. // *ПТЭ*, 1969, №1. С.49.

17. Drake D.M., Feldman W.C., Hurlbut C. // *Nucl. Instrum. & Methods.*, 1986, V. 247. P. 576.

18. Бруданин В.Б., Кочетов О.И., Немченко И.Б., Смольников А.А. // *Изв. АН, Сер. Физ.*, 2001, Т. 65, №1, с. 60.

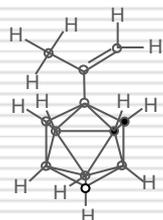
19. Бритвич И.Г., Васильченко В.Г., Кириченко В.Н. и др. // *ПТЭ*, 2002, №5, с. 66.

20. Акопян Г.Г., Гавалян В.Б. // *ПТЭ*, 2005, №2, с. 67.

21. Carturan S., Quaranta A., Marchi T., etc. // *Radiation protection & Dosimetry*, 2011, V. 143, N 2-4, P. 471.

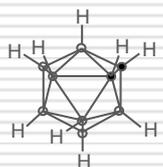
22. V.D.Ryzhikov, S.M.Desenko, I.V.Kopina, L.Sh.Afanasiadi, V.V.Chernikov, G.M.Onyshchenko // *Problems of atomic science and technology*, 2004, № 2, С. 169.

# В-содержащие ПС



изопропенил-о-карборан [16]

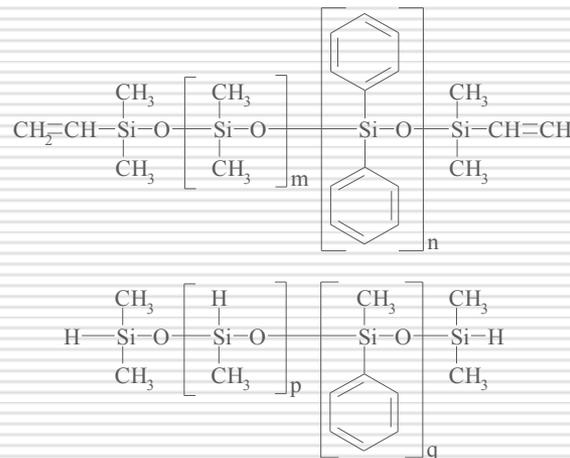
- - атомы углерода
- - атомы бора



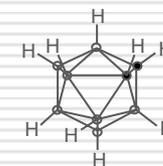
о-карборан [18-20]

Показатели [18]	Массовая доля бора, %				
	0	0,38	0,75	2,00	5,00
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
Показатель преломления	1,57	1,57	1,58	1,58	1,54
Количество атомов бора в 1 см <sup>3</sup> , ×10 <sup>22</sup>	—	0,02	0,04	0,12	0,28
Количество атомов водорода в 1 см <sup>3</sup> , ×10 <sup>22</sup>	4,85	4,85	4,85	4,86	4,86
Количество атомов углерода в 1 см <sup>3</sup> , ×10 <sup>22</sup>	4,85	4,83	4,82	4,75	4,58
Относительный световыход, %	100	97	88	78	70
Эффективность регистрации тепловых нейтронов (E ≤ 0,5 eV), %	0	3	5	13	22

Показатели	Изопропенил-о-карборан	о-Карборан
Устойчивость к различным воздействиям	+	+
Растворимость в органических средах	+	+
Отсутствие поглощения в видимой области	+	+
Способность к сополимеризации	+	-
Содержание бора	60 %	75%



[21]



о-карборан

16. Анисимова Г.И., Данелян Л.С., Жигач А.Ф., Лазаренко В.Р., Сирятская В.Н., Сорокин П.З. // ПТЭ, 1969, №1. С.49.

18. Бруданин В.Б., Кочетов О.И., Немченко И.Б., Смольников А.А. // Изв. АН, Сер. Физ., 2001, Т. 65, №1, с. 60.

19. Бритвич И.Г., Васильченко В.Г., Кириченко В.Н. и др. // ПТЭ, 2002, №5, с. 66.

20. Акопян Г.Г., Гавалян В.Б. // ПТЭ, 2005, №2, с. 67.

21. Carturan S., Quaranta A., Marchi T., etc. // Radiation protection & Dosimetry, 2011, V. 143, N 2-4, P. 471.

# В-содержащие ПС

**BC 454 [12, 17]:** боросодержащая добавка – производное декаборана [17].

## Свойства BC 454 [12]

	Массовая доля бора, %		
	1	5	10
Световыход отн. антрацена, %	60	48	38
Длина волны максимума излучения, нм	425	425	425
Прозрачность (BAL), см	120	120	120

## Свойства EJ 254 [13]

	Массовая доля бора, %		
	1	2,5	5
Световыход отн. антрацена, %	60	56	48
Световыход, фотонов/МэВ	9200	8600	7500
Длина волны максимума излучения, нм	425	425	425

## Свойства ПС [22]

Основное вещество сцинтиллятора	Полистирол
Боросодержащая добавка	Аллилдекаборан
Массовая доля бора, %	20
Световыход отн. антрацена, %	42

12. [www.detectors.saint-gobain.com](http://www.detectors.saint-gobain.com).

13. [www.eljentechnology.com](http://www.eljentechnology.com).

17. Drake D.M., Feldman W.C., Hurlbut C. // Nucl. Instrum. & Methods., 1986, V. 247. P. 576.

22. V.D.Ryzhikov, S.M.Desenko, I.V.Kopina, L.Sh.Afanasiadi, V.V.Chernikov, G.M.Onyshchenko // Problems of atomic science and technology, 2004, № 2, С. 169.

# Cd-содержащие ЖС



Toluene 781 g  
 Terphenyl 3 g  
 αNPO 20 mg  
 Cadmium Propionate 74 g†  
 Methanol (abs) 142 g

**Массовая доля Cd – 3,12 %.**

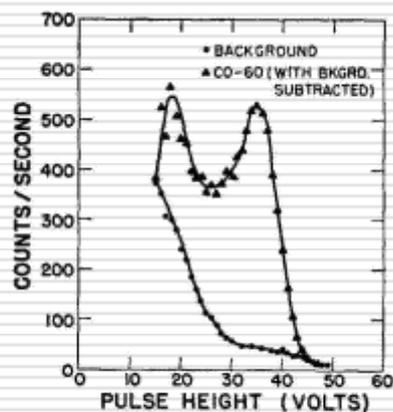


Fig. 7. Pulse height spectrum obtained with central  $\text{Co}^{60}$  source.

**[23]**

**Прозрачность  
на 415 нм – 5 м.**

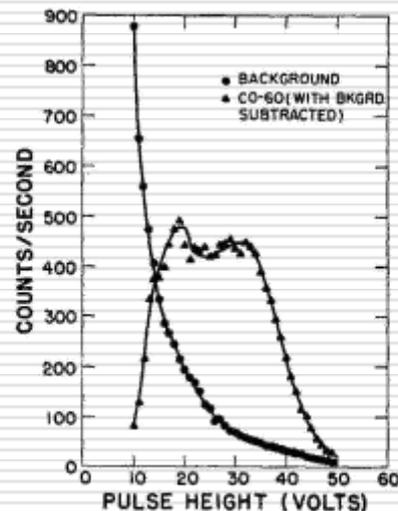


Fig. 8. Pulse height spectrum obtained with central  $\text{Co}^{60}$  source and with cadmium propionate in the solution.

**Прозрачность  
на 415 нм – 1 м.**

**[24]** – 0,98% Cd. Световыход – 70% относительно незагруженного образца. Энергетическое разрешение – 23% ( $\gamma$  – 662 кэВ).

23. Reines F., Cowan C.L., Harrison Jr. F. B., Carter D.S. // Rev. Sci. Instr., 1954, V. 25, No 11, P.1061.

24. Beard G.B., Kelly W.H. // Phys. Rev., 1961, V. 122, No 5, P. 1576.

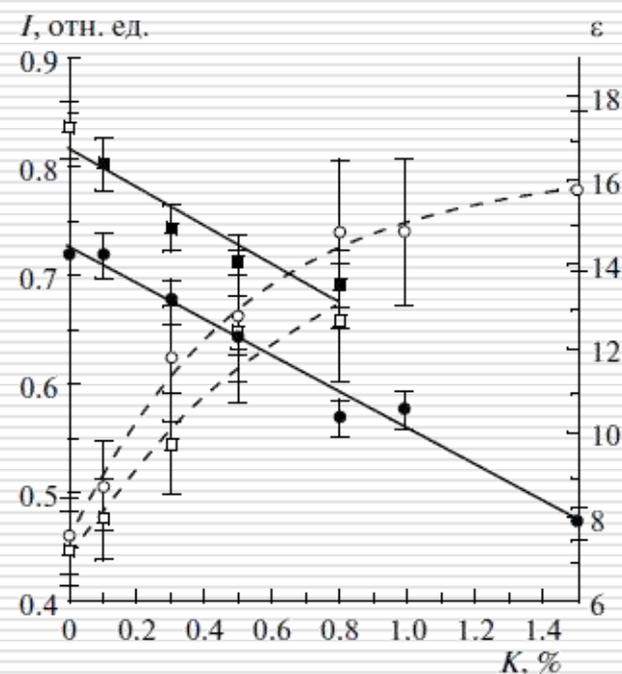
# Cd-содержащие ЖС [25]

**Кадмийсодержащая добавка:** хлорид кадмия

**Массовая доля Cd** – до 1,5 %.

**Растворитель:** линейный алкилбензол - трибутилфосфат

Зависимость световыхода  $I$  (левая ось ординат, сплошные кривые с черными квадратами и кружками) и эффективности регистрации  $\epsilon$  тепловых нейтронов (правая ось ординат, штриховые кривые с светлыми квадратами и кружками) для Cd-ЖС в зависимости от содержания ТБФ (квадраты – 30% ТБФ, кружки – 40% ТБФ).



# Li-содержащие ОС [26]



Gamma-Ray Fluorescence of Solutions Containing Various Metal Salts

Salt	Salt concentration* (gm/l)	Relative* intensity (%)	Effects of naphthalene			
			Conc. (gm/l)	Rel.* intensity (%)	Conc. (gm/l)	Rel.* intensity (%)
Lithium chloride	10	35	5	55	20	85
Sodium chloride	15	40	5	60	15	75
Sodium bromide	15	30	5	45	40	100
Sodium iodide (5% H <sub>2</sub> O)	6	25	5	35	25	50
Sodium iodide (10% H <sub>2</sub> O)	20	4	10	10	70	15†
Potassium bromide	15	30	5	45	50	100†
Potassium iodide	10	8	5	10	70	30
Potassium nitrate	15	35	5	55	50	125
Cupric nitrate	15	25	5	35	50	70
Silver nitrate	10	15	5	20	60	50
Lead acetate	15	55	5	85	70	150
Uranium nitrate	15	15	5	20	70	40

\* Solvent is p-dioxane + water 20%; fluorescing solute is 2,5-diphenyloxazole (~5 gm/l). Intensities are measured relative to this as standard, without salt or naphthalene.

† Two phases at room temperature.

# Li-содержащие ЖС [27]

**Литийсодержащая добавка:**  
пропионат лития

**Растворитель:** толуол – метанол

**Следствие:** очень низкий световыход

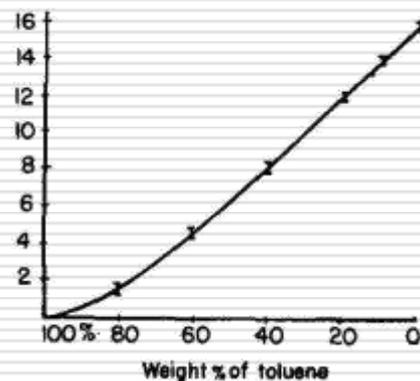


FIG. 1. Solubility of PLi in the toluene-methanol mixture expressed as weight percentage of PLi vs weight percentage of toluene (at 20°C).

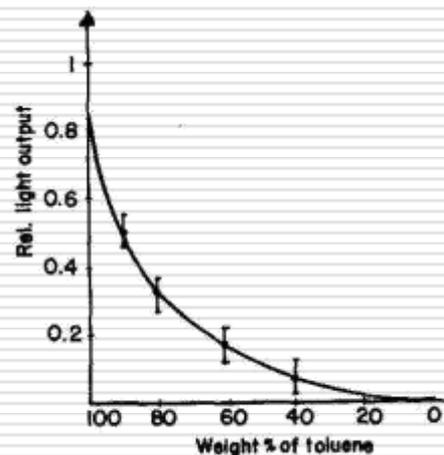


FIG. 2. Light output of lithium-loaded scintillator (relative to a solution containing no lithium compound) vs weight percentage of toluene in the solution.

# Li-содержащие ЖС

**Литийсодержащая добавка:**  
салицилат лития

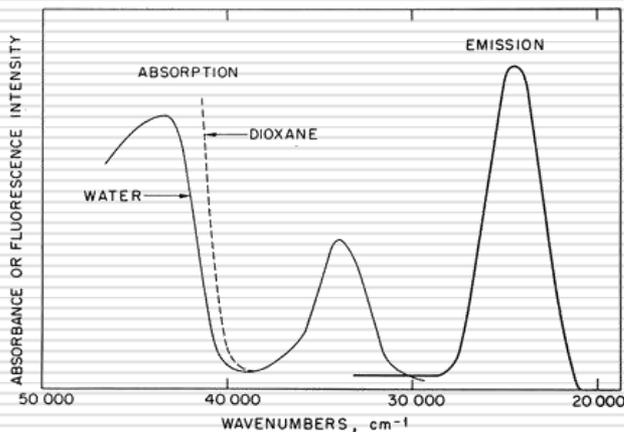
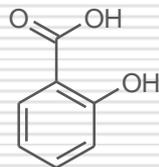


Fig. 1. Absorption and emission characteristics of LISA-6.

**Растворители:**

диоксан – [28];  
диоксан : вода – [28, 29];  
толуол : метанол – [29].

**низкий световыход;  
пожароопасны**

**NE320 [30]:** основное вещество сцинтиллятора –  
1,2,4-триметилбензол (псевдокумол)

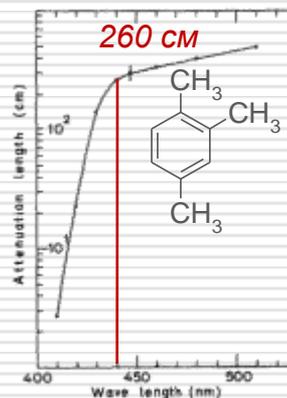


Fig. 1. Light attenuation length of NE320 as a function of wavelength.

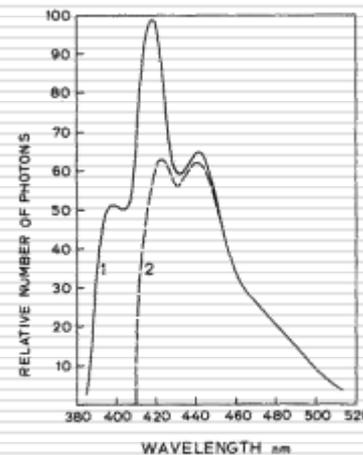


Fig. 2. Emission spectrum of origin (curve 1) and after traveling through 10 cm of scintillate (curve 2).

Table 1  
Characteristics of NE320 compared to NE224

Liquid scintillator	NE320	NE224
Lithium-6 loading	0.15%	0
Attenuation length at 440 nm	260 ± 30 cm	500 cm
Light yield (% of anthracene)	31% ± 5%	80%
PSD figure of merit		
$M_1^{a)}$	2.0	2.4
$M_2^{b)}$	2.3	
$M_3^{c)}$	2.7	

<sup>a)</sup> AmBe source at 638 keV, EMI 9821B tube.

<sup>b)</sup> AmBe source at 638 keV, RTC 3462D tube.

<sup>c)</sup> AmLi source at 529 keV, RTC 3462D tube.

28. Ross H.H., Yerick R.E. // Nucl. Sci. and Eng., 1964, V. 20, P. 23.

29. Greenwood L.R., Chellew N.R., Zarwell G.A. // Rev. Sci. Instr., 1979, V. 50, No 4, P. 472.

30. Ait-Boubker S, Avenier M., Bagieu G., ets. // Nucl. Instr. & Methods, 1989, V. A277, P. 461.

# Li-содержащие ЖС

## Свойства ЖС, описанного в работе [31]

Основное вещество сцинтиллятора	Нефтяная фракция
Температура кипения, °С	250 - 370
Температура вспышки, °С	120
Литийсодержащая добавка	$\text{LiOCH}_3$
Массовая доля лития, %	0,1 – 2,5
Концентрация РРО, г/л	1 – 4
Концентрация РОРОР, г/л	0,01
Световыход* отн. антрацена, %	30
Прозрачность* (420 нм), м	> 10

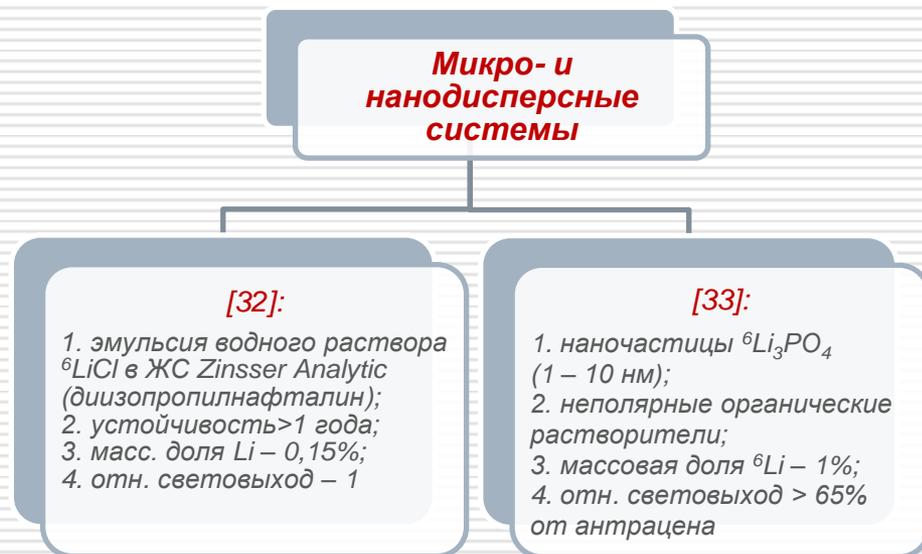
\*Для сцинтиллятора состава:

РРО – 2 г/л;

РОРОР – 0,01 г/л;

Li – 1 %.

## Современное состояние



31. Патент РФ № 2078355.

32. Fisher B.M., Abdurashitov J.N., Coakley K.J. et al., // Nucl. Instr. & Methods, 2011, V. A646, P. 126.

33. Патент США № 2011009523A1, дата публикации – 28 апреля 2011.

# Li-содержащие ПС

## Литиевые соли борных кислот:



## Сцинтилляторы, описанные в работе [34]

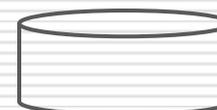
TABLE I  
Performance of <sup>6</sup>Li-salicylate crystal detectors.

Sample no.	Sample type	Crystal dispersion medium	wt % LISA	M
1	Crystals, recrystallized from water solution	None	100	0.9
2	Crystals, recrystallized from ethanol solution	None	100	0.7
3	Crystals, recrystallized from methanol solution	None	100	0.6
4	Disc, plastic polymerized with hardener	Acrylic polyester resin with methyl ethyl ketone peroxide <sup>a</sup>	31	1.2
5	Disc, pressed at 4200 psi	Potassium bromide	9	1.3
6	Disc, pressed at 4200 psi	None	100	1.2
7	Disc, plastic pressed at 4200 psi	Polymerized methyl methacrylate powder <sup>b</sup>	10	0.7
8	Disc, plastic polymerized at 125°C	Polyvinyl toluene	11	1.0
9	Disc, solvent evaporated	Cellulose nitrate in butyl acetatoluol solvent <sup>b</sup>	6	None
10	Slurry	Vinyl toluene monomer	10	1.6
11	Slurry	Water	~90	1.2
12	Slurry	Silicone optical coupling grease <sup>b</sup>	10	0.7

<sup>a</sup> Castolite AP, Castolite Co., Woodstock, IL.

<sup>b</sup> Evidence of some LISA reaction with dispersion medium.

$D = 29 \text{ мм}$



$H = 10, 2 \text{ мм}$

## Сцинтилляторы, описанные в работе [35]

Масс. доля Li, %	Световыход <sup>a</sup> , %		Пропускание (405 нм), %		Эфф. регистр. тепл. нейтр. %	
	ПММА	ПММА + ПС	ПММА	ПММА + ПС	ПММА	ПММА + ПС
0,1	44	42	73,5	48,1	14,5	20,0
0,2	47	—	70,6	—	35,3	—
0,3	42	39	66,5	39,1	47,8	46,8
0,4	42	—	68,0	—	50,4	—
0,5	34	50	69,0	50,0	49,3	56,4

15. Барони Е.Е., Викторов Д.В., Розман И.М., Шоня В.М. // Nucl. Electronics, 1962, V.1, p. 131.

34. Greenwood L.R., Chellev N.R. // Nucl. Instr. & Methods, 1979, V. 165, P. 129.

35. Негина В. Р., Попов В.Н., Назаров В.В. // ПТЭ, 1980, №5, С. 60.

# ОС, содержащие металлы III группы

---

**$^{115}\text{In}$  – солнечные нейтрино [36]:**



**$^{160}\text{Gd}$  – солнечные нейтрино [37, 38, 40]:**



**двойной  $\beta$ -распад [41, 42]**

**$^{176}\text{Yb}$  – солнечные нейтрино [39, 40]:**

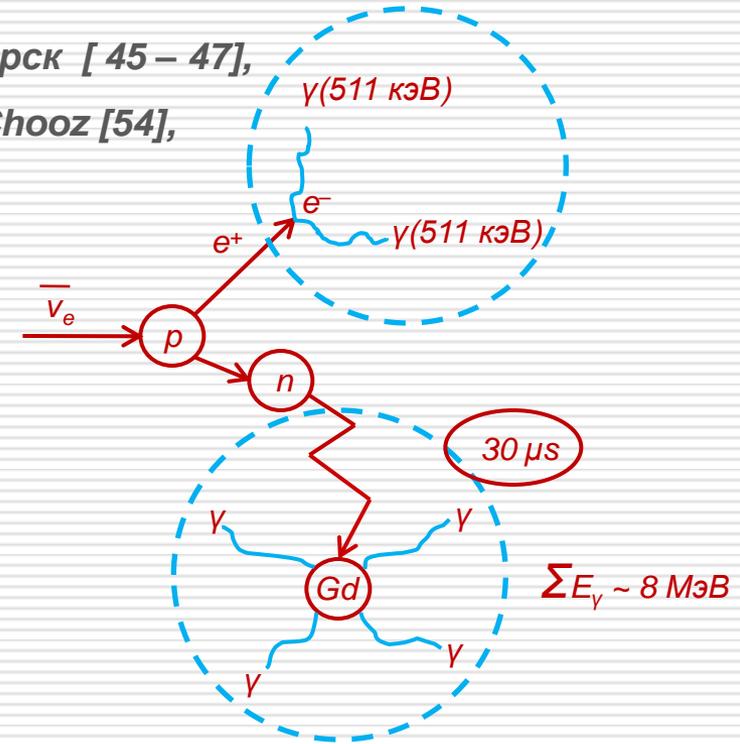
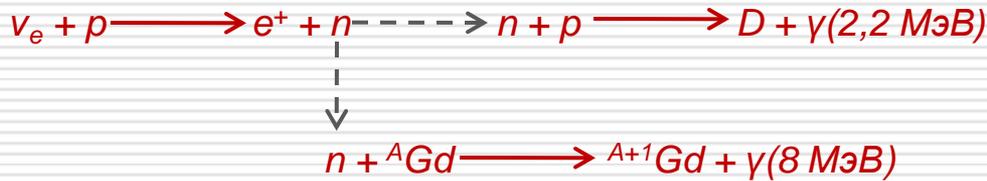


**двойной  $\beta$ -распад [41 – 43]**

36. Raghavan R.S. // *Phys. Rev. Lett.* 1976, V. 37, P. 259.
37. Raghavan R.S. // *Phys. Rev. Lett.* 1997, V. 78, No. 19, P. 3618.
38. Gratta G., Wang Y.F. // *Nucl. Instrum. & Methods.* 1999, V. A438, P. 317.
39. Raghavan R.S. // *Phys. Rev. Lett.*, 1997, V. 78, N. 19, P. 3618.
40. Cribier M. // *Nucl. Phys. B*, 2000, V. 87, P. 195.
41. Tretyak V. I., Zdesenko Y. G. // *Atomoc Data and Nuclear Data Tables*, 2002, V.80, P. 83.
42. Zdesenko Y. // *Reviews of Modern Physics*, 2002, V. 74, P. 663.
43. Zuber K. // *Phys. Lett. B*, 2000, V. 485, P. 23.

# ОС, содержащие металлы III группы

$^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  – нейтринные осцилляции ([44], Красноярск [45 – 47], Chooz [48], Palo Verde [49], Daya Bay [50 – 53], Double Chooz [54], Reno [58 – 61], Angra [62], Kaska [63], Braidwood [58]:



44. Cowan C.L., Reines F., Harrison F.B., Kruse H.D., McGuire A.D. // *Science*, 1956, V. 124, P. 103.
45. Mikaelyan L.A., Sinev V.V. // *Phys. Atom. Nucl.* 2000, V. 63, P. 1002.
46. Mikaelyan L. // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.*, 2001, V. 91, P. 120.
47. Mikaelyan L.A. // *Phys. Atom. Nucl.*, 2002, V.65, P. 1173.
48. Apollonio M. et al. (Chooz Collaboration) // *Eur. Phys. J.*, 2003, V. C27, P. 331.
49. Boehm F, et al. (Palo Verde Collaboration) // *Phys. Rev.*, 2000, D62, P. 072002.
50. Wang Y. // *Int.J.Mod.Phys.*, 2005, V. A20, P. 5244.
51. arXiv:hep-ex/0701029v1 15 Jan 2007.
52. An F.P., An Q., Bai J. Z, et al. // *Nucl. Instrum. & Methods*, 2012. V. A685, P. 78.
53. An F.P., Bai J.Z., Balantekin A.B., et al. // *Phys. Rev. Lett.*, 2012. V. 108, P. 171803-1.
54. arXiv:hep-ex/0606025v4 30 Oct 2006.
55. Akiri T. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2011, V. 215, P.69.
56. Reyna D. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2011, V. 221, P. 236.
57. Abe Y., Aberle C., Akiri T., et al. // *Phys. Rev. Lett.*, 2012. V. 108, 131801-1.
58. <http://www.hep.anl.gov/mcg/goodmankorea.ppt>.
59. Soo-Bong Kim // *Progr. in Part. & Nucl. Phys.*, 2010, V. 64, P. 346.
60. Jeon E.-J. // *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 2011, P. 137.
61. Ahn J.K., Chebotaryov S., Choi J.H., et al., // *Phys. Rev. Lett.*, 2012. V. 108, 191802-1.
62. arXiv:hep-ex/0511059.
63. arXiv:hep-ex/0502002.

# *In- и Yb-содержащие ЖС*

---

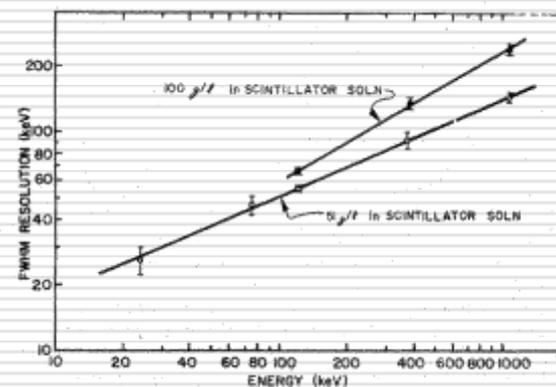
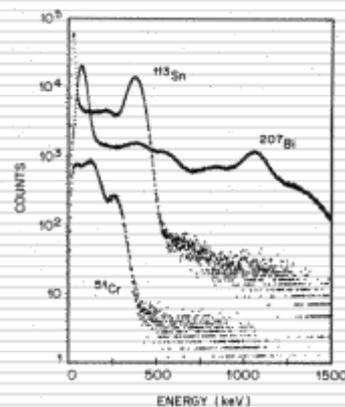
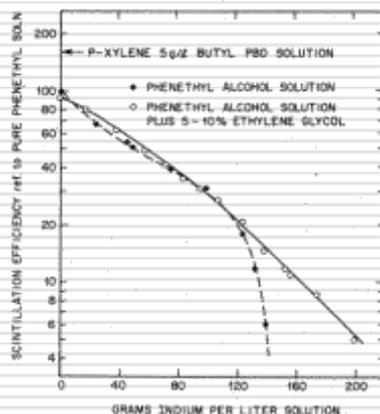


# In-содержащие ЖС

Литературный источник	[24]
Производитель	NE
Индийсодержащая добавка	Три(метил?)гексаноат
Массовая доля индия, %	1
Световой выход, %, отн. незагруженного образца	47
Энергетическое разрешение ( $\gamma$ , 662 кэВ), %	28

[64, 65]:

- индийсодержащая добавка – трифторацетат индия;
- основное вещество – фенолэтиловый спирт с добавкой этиленгликоля.



24. Beard G.B., Kelly W.H. // Phys. Rev. , 1961, V. 122, No 5, P. 1576.  
 64. Pfeiffer L., Mills A.P., Raghavan R.S., Chandross E.A. // Phys. Rev. Lett., 1978, V. 41, No 1, P.63.  
 65. Pfeiffer L., Mills A.P., Chandross E.A., Kovacs T. // Phys. Rev. C, 1979, V. 19, No 3, P. 1035.

# In-содержащие ЖС [66]

## Состав сцинтилятора:

- основное вещество – (?)-кислол;
- эмульгаторы;
- индийсодержащая добавка –  $InCl_3 \cdot 4H_2O$
- первичная добавка – DPO;
- сместитель спектра – bis-MSB.

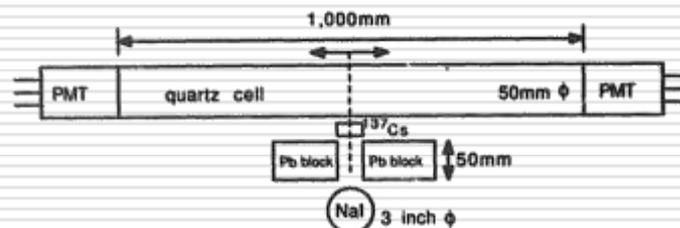


Fig. 5. The experimental arrangement used for the measurement of the attenuation length. The two photomultiplier tubes were attached at both ends of the 1 m long quartz cell. The backscattered 477 keV Compton electrons were used for the measurement.

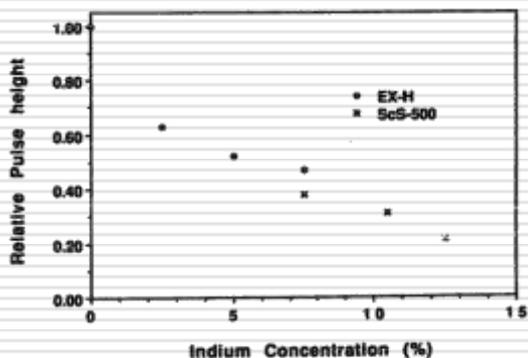


Fig. 4. Relative pulse heights for the 0–7.5% indium-loaded EX-H-based liquid scintillators and for the 7.5–12.5% indium-loaded ScS-500-based liquid scintillators that contain different surfactants.

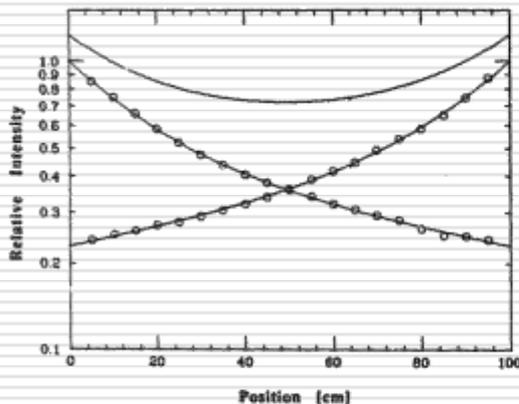


Fig. 6. The light attenuation of the indium-loaded liquid scintillator for the 1 m quartz cell with a diameter of 5 cm. The measurements were done at every 5 cm and the pulse height outputs of the left and right photomultipliers were plotted. The simple sum of the two outputs is also shown.

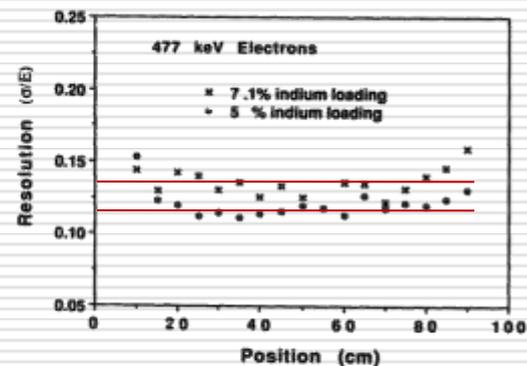


Fig. 7. The energy resolution obtained by combining two pulse heights from the PMTs at each measured point along the 1 m quartz cell for the 7.1 and 5% indium-loaded liquid scintillator. The resolution is almost uniform along the cell except near the ends where the resolution becomes slightly worse.

# In-содержащие ЖС [67]

## Состав сцинтиллятора:

- основное вещество – (?) -ксилол + минимальное (?) количество фенолэтилового спирта
- индийсодержащая добавка – трифторацетат

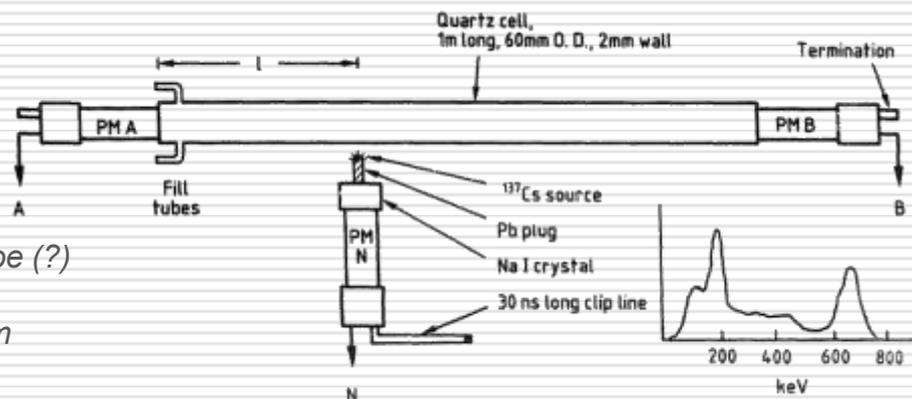


Table 1  
Summary of light output and attenuation results

Liquid cells		Relative light output		Light absorption length [cm]	Resolution $\sigma/E$ at 477 keV	$k = \frac{\sigma}{\sqrt{E}[\text{keV}]}$
% indium	type of cell	A + B at centre	Extrapolated at one end			
0	quartz	440	315	155	0.10	2.2
5	quartz	70	88	54	0.22	4.8
10	quartz	26	37	45	0.37	8.2
0	FEP	180	230	58	0.13	2.8
0	mylar	250	250	80	0.12	2.6
<i>Sandwich counters</i>						
	NE102A (5 mm)	260	260	74	0.11	2.4
	GS2037 (1.5 mm)	110	140	53	0.19	4.1

# In-содержащие ЖС [68]

## Основное вещество сцинтилляторов:

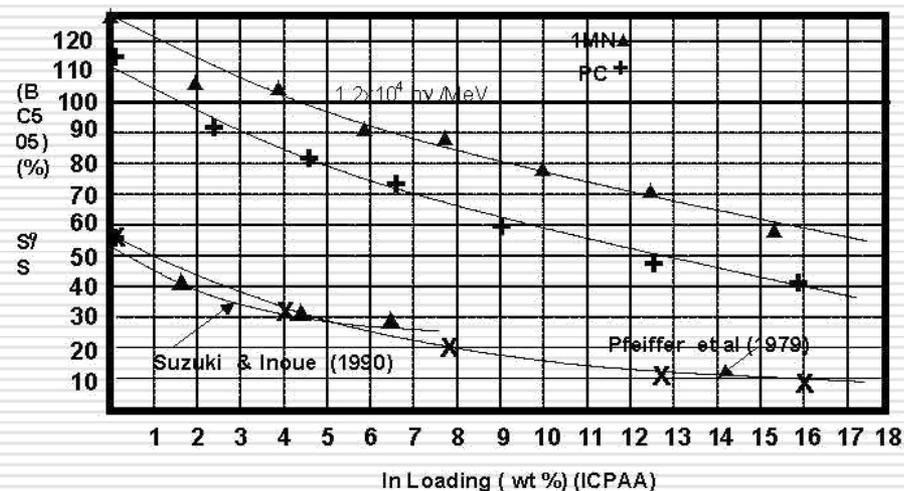
- $\alpha$ -метилнафталин;
- псевдокумол.

## Индийсодержащая добавка – ???

Массовая доля In – до 16%.

## Сцинтилляционные добавки – ???

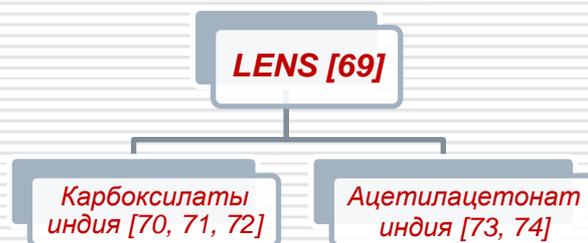
Прозрачность для 9% In (PC) на 430 нм – 2 м.



# In-содержащие ЖС

**Карбоксилаты In (C4 – C5)** могут быть использованы только в присутствии фосфорсодержащих лигандов (ТИАРО).

**Карбоксилаты In (C ≥ 6)** используют непосредственно.



Технология	Liquid-liquid extraction
Основное вещество	Псевдокумол
Экстрагент	2-Метилвалериановая кислота
Концентрация In	55 г/л
Первичная добавка	ВРО
Концентрация ВРО	4 г/л
Сместитель спектра	bis-MSB
Концентрация bis-MSB	15 мг/мл
Световыход	8500 фотозлектрона/МэВ
Прозрачность (430 нм)	1,5 м
Устойчивость показателей	> 2 лет

Технология	Solid dissolution
Основное вещество	Анизол
In-содержащая добавка	Ацетилацетонат индия
Концентрация In	52 г/л
Первичная добавка	ВРО
Концентрация ВРО	100 г/л
Световыход	7000 фотозлектрона/МэВ
Прозрачность (430 нм) без ВРО	3 – 5 м

69. Buck C., Barabanov I., Besida O., et. al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 2005, V. 143, P. 487.

70. Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Корпусов Г.В. и др. // Радиохимия, 2005, Т. 47, № 5, С. 445.

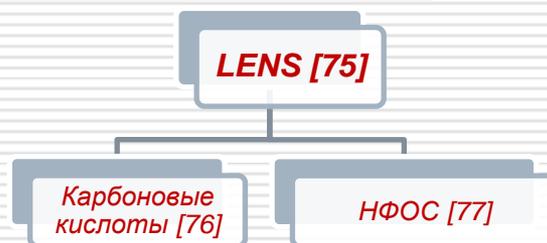
71. Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Цивадзе А.Ю. и др. // Радиохимия, 2008, Т. 50, № 3, С. 236.

72. Барабанов И.Р., Безруков Л.Б., Гуренцов и др. // ПТЭ, 2010, № 4, С. 50-56.

73. Buck C., Hartmann F.X., Schönert S., et. al. // Journ. of Radioanalyt. and Nucl. Chem., 2003, V. 258, No. 2, P. 255.

74. Buck C., hartmann F.X., Lasserre T., et. al. // Journ. of Luminescence, 2004, V. 106, P. 57.

# Yb-содержащие ЖС



<b>Технология</b>	<i>Liquid-liquid extraction</i>
<b>Основное вещество</b>	<i>неизвестно</i>
<b>Экстрагент</b>	<i>2-Этилгексановая кислота</i>
<b>Концентрация Yb</b>	<i>До 15 %</i>
<b>Первичная добавка</b>	<i>неизвестно</i>
<b>Сместитель спектра</b>	<i>неизвестен</i>
<b>Световыход</b>	
0% Yb	100%
5% Yb	77%
9% Yb	61%
13% Yb	54%

<b>Технология</b>	<i>Liquid-liquid extraction</i>
<b>Основное вещество</b>	<i>Псевдокумол</i>
<b>Экстрагент</b>	<i>ДББФ, ТИАФО</i>
<b>Концентрация Yb</b>	
50% ДББФ	50% ДББФ – 76 г/л,
38% ТИАФО	38% ТИАФО – 72 г/л
<b>Первичная добавка</b>	<i>ВРО</i>
<b>Концентрация ВРО</b>	<i>8 г/л</i>
<b>Сместитель спектра</b>	<i>bis-MSB</i>
<b>Концентрация bis-MSB</b>	<i>0,1 г/л</i>
<b>Световыход</b>	
BC505	100%
50% ДББФ – 76 г/л,	23
38% ТИАФО – 72 г/л	38
<b>Устойчивость показателей</b>	<i>&gt; 1,5 лет</i>

ДББФ – дибутилбутилфосфонат  
ТИАФО - триизоамилфосфиноксид

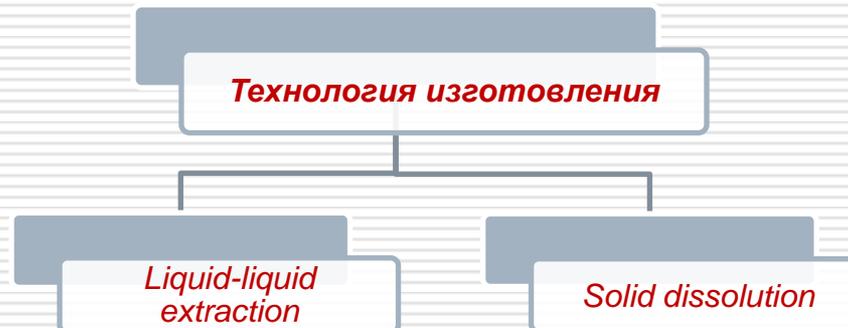
75. Kornoukhov V.N. // *Particles and Nuclei, Letters*, 2001, V. 108, No 5, P. 58.

76. Raghavan R.S., // *Phys. Rev. Lett.*, 1997, V. 78, No 19, P. 3618.

77. Данилов Н.А., Крылов Ю.С., Корпусов Г.В. и др. // *Радиохимия*, 2003, Т. 45, № 2, С. 128.

# *Gd-содержащие ЖС*

---



# Gd-содержащие ЖС

**Gd-содержащая добавка – нитрат гадолиния [78 – 80].**

**[78]:** растворитель – (?)-ксилол с добавками гексилового, этилового и метилового спиртов.

**[79]:** растворитель – атмосферный соляр. Гадолиний вводился в виде комплекса нитрата с трибутилфосфиноксидом.

**CHOZ [80]:**

Table 5. Main properties of the liquid scintillators used in the experiment

	Gd-loaded	unloaded
Chemical content:		
basic	Norpar-15 (50% vol.)	Mineral oil (82.8% vol.)
aromatics, alcohols	IPB+hexanol (50% vol.)	IPB (7.2% vol.)
wavelength shifters	p-PTP+bis-MSB (1 g/l)	PPO + DPA (1.5 g/l)
Atomic mass composition:		
H	12.2%	13.3%
C	84.4%	85.5%
Gd	0.1%	
others	3.3%	1.2%
compatibility	acrylic, Teflon	
density (20 °C)	0.846 g/ml	0.854 g/ml
Flash point	69 °C	110 °C
Scintillation yield	5300 ph/MeV (35% of anthracene)	
Optical attenuation length	4 m	10 m
Refractive index	1.472	1.476
Neutron capture time	30.5 μs	180 μs
Neutron capture path length	~ 6 cm	~ 40 cm
Capture fraction on Gd	84.1%	

$$\lambda(t) = \frac{\lambda_0}{1 + vt}$$

**Время снижения прозрачности в «е» раз – 240 дней.**

78. Kruse H.W., Fullman E.W. // IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1983, V. NS-30, No 1. P. 387.

79. Патент РФ № 2069872.

80. Apollonio M., Baldini A., Bemporad C. et al. // Eur. Phys. J., 2003, V. C27, P.331.

# Gd-содержащие ЖС [68]

**Gd-содержащая добавка** – нитрат гадолиния.  
**Соразтворитель** – трибутилфосфат.

Растворитель	Температура вспышки, °C
Псевдокумол	52
Фенилсилилэтан	120
$\alpha$ -Метилнафталин	82
$\alpha$ -Гидрокситолуол	93
Диизопропилнафталин	150

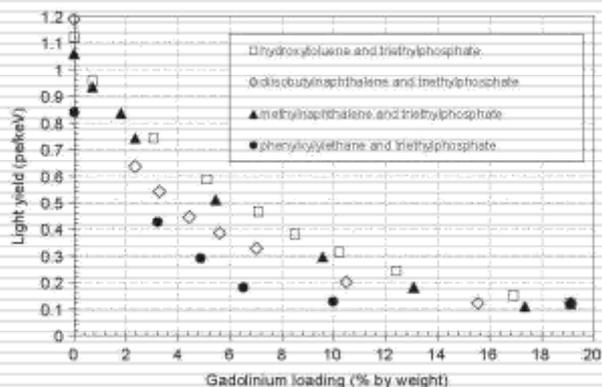


Fig. 2. Effect of increasing the gadolinium loading on the light collection from the scintillator blend.

Технология	Solid dissolution
Основное вещество	$\alpha$ -Гидрокситолуол
Соразтворитель	Трибутилфосфат
Gd-содержащая добавка	Нитрат гадолиния
Концентрация Gd	10%
Первичная добавка	PBD
Концентрация PBD	4 г/л
Сместитель спектра	$\alpha$ -NPO
Концентрация bis-MSB	0,3 г/л
Световыход	0,34 фотозлектрона/кэВ
Прозрачность (430 нм) с BPO и bis-MSB	1,42 м
Устойчивость показателей	> 1 года

Table 1  
 Properties of gadolinium-loaded  $\alpha$ -hydroxytoluene-based scintillators

Property	Percentage loading of gadolinium				
	0	2.5	5.0	7.5	10.0
Boiling point (°C)	205	205	207	208	212
Flash point (°C)	93	98	103	105	109
Light collection pe/keV	1.13 ± 0.057	0.78 ± 0.039	0.58 ± 0.029	0.46 ± 0.023	0.34 ± 0.017
Attenuation length (cm)	3010 ± 420	1460 ± 153	366 ± 18	209 ± 10	142 ± 8

# Gd-содержащие ЖС

[82]:

Технология	Solid dissolution
Основное вещество	Уайт-спирит
Gd-содержащая добавка	Октоат гадолиния
Концентрация Gd	2,4 г/л
Первичная добавка	PPO
Концентрация PPO	1 г/л
Сместитель спектра	РОРОР
Концентрация РОРОР	0,03 г/л
Световыход	30% отн. антрацена
Прозрачность	
420 нм	2,5 м
440 нм	3,4 м
460 нм	5,6 м
Эффективность регистрации нейтронов	86%

Palo Verde [83, 84]:

Технология	?
Основное вещество	Псевдокумол : минеральное масло = 2 : 3
Gd-содержащая добавка	2-этилгексаноат гадолиния
Концентрация Gd	0,1%
Первичная добавка	365 нм, PPO – ?
Сместитель спектра	425 нм, диметил-РОРОР – ?; bis-MSB – ?
Световыход	55,3% отн. антрацена
Время набора данных	2 года

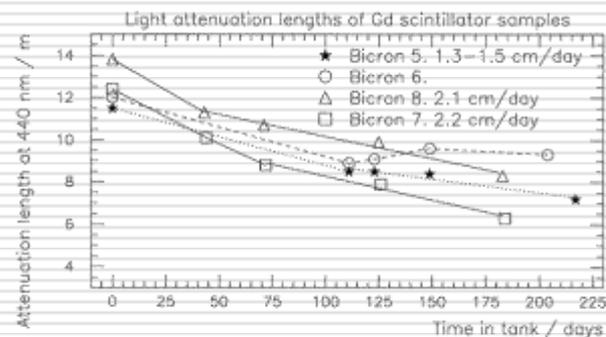


Fig. 4. Time development of the light attenuation length for Gd scintillator batches. Samples have been taken from the acrylic tank.

82. Марков Ю.А., Ряжская О.Г. // ПТЭ, 1970, № 4, С. 50.  
 83. Piepke A.G., Moser S.W., Novikov V.M. // Nucl. Instr. & Methods, 1999, V. A432, P.392.  
 84. Boehm F., Buzenitz J., Cornis J. et. al. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 1999, V. 70, P.191.

# Gd-содержащие ЖС

## DOUBLE CHOZZ [57, 85, 86]

$\beta$ -Дикетонаты [57,85]

Карбоксилаты [85, 86]

**Table 2.** Light output (LO) of the solvent mixtures in relation to the component ratio. [BPO] = 4 g l<sup>-1</sup>, [BisMSB] = 15 mg l<sup>-1</sup>

TMD	Solvent, %				LO, %
	dodecane	PXE	MO		
100	--	--	--	--	100
80	--	20	20	--	96.0
80	--	--	20	--	98.0
60	--	--	40	--	95.0
40	--	--	60	--	84.0
30	--	--	70	--	79.0
20	--	--	80	--	65.0
--	100	--	--	--	41.0
20	80	--	--	--	77.0
20	--	80*	--	--	66.0
20	--	80**	--	--	47.0
30	70	--	--	--	80.0
30	--	70	--	--	82.0
40	60	--	--	--	85.0
35	65***	--	--	--	47.0
35	65****	--	--	--	48.0
--	80	20	--	--	48.0

\* After purging with argon.  
 \*\* Without purging with argon.  
 \*\*\* BPO 1.5 g l<sup>-1</sup>.  
 \*\*\*\* BPO 1 g l<sup>-1</sup>.

Технология	Solid dissolution
Основное вещество	PXE* : додекан = 1 : 4
Gd-содержащая добавка	Дипивалоилметанат гадолия
Концентрация Gd	1 г/л
Первичная добавка	PPO
Концентрация PPO	6 г/л
Сместитель спектра	bis-MSB
Концентрация bis-MSB	20 мг/л
Световойход	80% отн. 0% Gd
Устойчивость	Несколько месяцев

\*PXE – о-фенилксиллэтан

**Table 1.** Selected properties of the solvents used

Solvent	Formula	H : C	$d, g\ cm^{-3}$	bp, °C	Flash point, °C	Light output, % (rel. to TMB)	$Z_{eff}$ , m
TMB	C <sub>9</sub> H <sub>15</sub>	1.66	0.889	168.0	49.0	100.0	~12.0
PXE	C <sub>18</sub> H <sub>37</sub>	1.87	0.998	296.0	145.0	95.0	~12.0
Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	2.17	0.749	216.0	80.0	41.0	>30.0
MO*	--	~2.10	0.84-0.86	--	195.0	40.0	--
20% TMB + dodecane	--	2.0	0.78	--	>50.0	77.0	>20.0
20% PXE + dodecane	--	1.96	0.80	--	>80.0	--	>20.0
20% TMB + MO	--	1.50-2.10	0.84-0.89	--	>50.0	65.0-96.0	~15.0
White spirit	C <sub>9,6</sub> H <sub>19,2</sub>	~2.20	0.76	--	~35.0	30.0	>20.0

\* The density and flash point of solvent (d) vary with the fraction utilized.

**Table 3.** Light output (LO, %), and transparency ( $I_{432}$ , m) of the solvent (20% PXE + 80% dodecane) in relation to the concentration of the scintillator additives. Measurements against 100% TMB containing 4 g l<sup>-1</sup> BPO + 15 mg l<sup>-1</sup> BisMSB

Additive concentration, g l <sup>-1</sup>	BPO		PPO		PTP	
	LO	$I_{432}$	LO	$I_{432}$	LO	$I_{432}$
0	--	12.5	--	2.5	--	12.5
1.0	43.0	3.8	32.0	9.0	28.0	9.1
2.0	45.0	7.7	40.0	8.2	37.0	--
3.0	46.0	7.5	39.0	--	--	*
4.0	48.0	7.3	37.0	7.5	--	*
5.0	48.0	--	39.0	--	--	*
6.0	47.0	6.9	37.0	7.1	--	*
10.0	--	6.2	--	6.4	--	*

\* Scintillator limit.

**Table 7.** Selected results of testing the scintillator samples (2 g l<sup>-1</sup> BPO + 15 mg l<sup>-1</sup> Bis-MSB), prepared from the concentrates, by the liquid extraction method

Diluent (PXE : dodecane, %)	Concentrates				Scintillator samples			
	[Gd] (g l <sup>-1</sup> )	compound	[Gd] : [BPO] ratio	[H <sub>2</sub> O], M	drying agent (24-h contact)	[Gd] (g l <sup>-1</sup> )	$I_{430}$ , m	LO, %
100 : 0	100	Gd(2MVA) <sub>2</sub> ·3HR·H <sub>2</sub> O	1 : 3	0.92	Zeolite A-20	2.1	7.5	44.0
20 : 80	71	Gd(2MVA) <sub>2</sub> ·8HR·H <sub>2</sub> O	1 : 3	0.84	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.0	12.8	44.0
20 : 80	112	Gd(2MVA) <sub>2</sub> ·HR·H <sub>2</sub> O	1 : 1	1.22	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.0	16.2	44.0
20 : 80	70	Gd(2EtHexA) <sub>2</sub> ·3HR·H <sub>2</sub> O	1 : 3	0.54	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.0	8.3	45.0

57. Abe Y., Aberle C., Akiri T., et al. // Phys. Rev. Lett., 2012. V. 108, 131801-1.  
 85. Ardellier F., Barabanov I., Barrière et. al. // arXiv:hep-ex/0606025v4 30 Oct 2006.  
 86. Данилов Н.А., Цивадзе А.Ю., Крылов Ю.С. и др. // Радиохимия, 2007, Т. 49, № 3, С. 248.

# Gd-содержащие ЖС

## DAYA BAY [50 – 53, 87 – 91]

Liquid-liquid extraction  
[51, 87]

Solid dissolution  
[51, 88 – 91]

<b>Технология</b>	Liquid-liquid extraction
<b>Основное вещество</b>	Линейный алкилбензол
<b>Температура вспышки</b>	130 °C
<b>Gd-содержащая добавка</b>	Карбоксилаты гадолиния
<b>Концентрация Gd</b>	0,1 %
<b>Первичная добавка</b>	Трет-бутилPBD
<b>Сместитель спектра</b>	bis-MSB
<b>Световыход</b>	90% отн. ЖС на основе псевдокумола

<b>Технология</b>	Solid dissolution
<b>Основное вещество</b>	Линейный алкилбензол
<b>Температура вспышки</b>	130 °C
<b>Gd-содержащая добавка</b>	3,5,5-Триметилгексаноат гадолиния
<b>Концентрация Gd</b>	1 г/л
<b>Первичная добавка</b>	PPO
<b>Сместитель спектра</b>	bis-MSB
<b>Световыход</b>	53% отн. антрацена

50. Wang Y. // *Int.J.Mod.Phys.*, 2005, V. A20, P. 5244.

51. arXiv:hep-ex/0701029v1 15 Jan 2007.

52. An F.P., An Q., Bai J. Z., et al. // *Nucl. Instrum. & Methods*, 2012. V. A685, P. 78.

53. An F.P., Bai J.Z., Balantekin A.B., et al. // *Phys. Rev. Lett.*, 2012. V. 108, P. 171803-1.

87. Yeh M., Garnov A., Hahn R.L. // *Nucl. Instr. & Methods*, 2007, V. A578, P. 329.

88. Ding Y., Zhang Z., Zhou P. et al. // *Journal of Rare Earths*, 2007, V. 75, Spec. Issue, P. 310.

89. Ding Y., Zhang Z., Liu J. et al. // *Nucl. Instr. & Methods*, 2008, V. A584, P. 238.

90. Ding Y., Gundorin N.A., Zhang Zh., Nemchenok I.B., Pikelner L.B. // *Functional materials*. 2009. V. 16. No. 1. P. 73.

91. Немченко И.Б., Ольшевский А.Г. Нейтринный эксперимент DAYA BAY // В сб.: *Сцинтилляционные материалы. Инженерия, устройство, применение* - Харьков: «ИСМА», 2011, С. 181–195.

# Gd-содержащие ЖС

## BC-521 Gadolinium Loaded Liquid Scintillator

BC-521 is formulated to yield the highest light output possible as well as long-term chemical stability. The standard gadolinium concentration is 0.5% by weight, but other concentrations up to 1.5% can be applied. Since the liquid is normally used in large tanks containing several hundred liters, it employs a high flash point solvent for safety purposes.

The principal applications of BC-521 are for neutron spectrometry and neutron research. It is ideal for use in large tanks for neutron multiplicity experiments.

Gadolinium has the highest thermal neutron capture cross-section of any element. The neutron capture reaction yields beta particles and several gamma rays having a total energy of about 8 MeV. Delayed coincidence and pulse shape discrimination techniques can be employed.

### Scintillation Properties -

Light Output, % Anthracene	88
(for 1% Gd concentration) % Anthracene	57
Wavelength of Maximum Emission, nm	424
Decay Time, short component, ns	30
Bulk Light Attenuation, meter	14

### Atomic Composition -

No. of H atoms per cc	$5.28 \times 10^{24}$
No. of C atoms per cc	$4.09 \times 10^{24}$
Ratio H/C atoms	1.314
No. of electrons per cc	$1.37 \times 10^{24}$

### General Technical Data -

Gadolinium content	0.5% w/w
Density	0.87 g/cc
Refractive index	1.39
Flash point	44°C

Scintillation Products  
division, Saint-Gobain



### USA

Saint-Gobain Crystals  
12345 Commerce Road  
Newbury, OH 44060  
Tel: (440) 764-2701  
Fax: (440) 764-3047

### Canada

Saint-Gobain Crystals  
11A Centre de la Recherche  
St-Helene  
11 New Brunswick Centre, Ottawa  
Tel: (613) 844-4533 ext. 3334  
Fax: (613) 844-4532 (1)

### UK

PO Box 2964  
TRIP 2R, Aylesbury  
150, Northway Lane  
Tel: 01295 803838  
Fax: 01295 803834

### Japan

Saint-Gobain Etc. Crystals Division  
S.T. Building 111, Chiyoda-ku  
Tokyo 102-8585, Japan  
Tel: 81 (0) 3 2545 2232  
Fax: 81 (0) 3 2545 2236

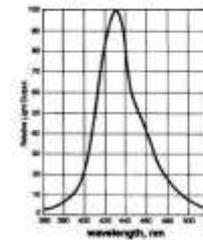
### China

Saint-Gobain (China) Investment Co., Ltd.  
15-01 CITIC Building  
12 Zhongyuan Road, An  
Hui District, Beijing 100044, China  
Tel: 86 (0) 10 6521 0322  
Fax: 86 (0) 10 6521 0666

www.saint-gobain.com/gobain-crystals

## BC-521 Gadolinium Loaded Liquid Scintillator

### Emission Spectrum -



SAINT-GOBAIN  
CRYSTALS

Manufacturer reserves the right to alter specifications.  
©2002 Saint-Gobain Crystals & Plastics, Inc. All rights reserved.

03-02

# Gd-содержащие ЖС

## BC-525 Gd Loaded Mineral Oil Based Liquid Scintillator

This scintillator, with its mineral oil component, has higher light transmission and higher flash point than traditional gadolinium loaded liquids. Both of these features recommend it highly for neutron spectrometry and neutron research. It is also more suitable for use in large tanks containing acrylic plastic components.

BC-525 is available with gadolinium concentrations up to 0.5% by weight. It is the result of a long term development program and possesses the two important properties of high light transmission and long term chemical stability.

### Scintillation Properties –

Light Output, % ArF/Ar	95
Decay Time, ns (in component)	3.8
Ball Light Attenuation, meters	14.5
Wavelength of Maximum Emission, nm	425

### Atomic Composition –

No. of H Atoms per cc	$6.00 \times 10^{23}$
No. of C Atoms per cc	$5.85 \times 10^{23}$
Ratio H:C Atoms	1.56
No. of Electrons per cc	$33.9 \times 10^{23}$

### General Technical Data –

Gadolinium Content	0.5% w/w
Density	0.88 g/cc
Refractive Index	1.49
Flash Point	90°C

Scientific Products  
Liquid Scintillators



### USA:

Saint-Gobain Crystals  
2200 E. Mineral Road  
Menasha, WI 54952  
Tel: (920) 764-2751  
Tel: (800) 234-8947

### Europe:

Saint-Gobain Crystals  
104 Route de Lathuay  
47132  
27000 Neufchâteau, France  
Tel: (33) 03 84 45 13 10  
Tel: (33) 03 84 45 13 03

PO Box 9897  
3740 100 Street  
The Netherlands  
Tel: (31) 90 46 24 700  
Tel: (31) 90 46 20 234

### Japan:

Saint-Gobain SA, Crystal Division  
4-1, Akasaka 2-chome, Chiyoda-ku,  
Tokyo 100-8565, Japan  
Tel: (81) 31 4 426 6000  
Tel: (81) 31 4 212 2300

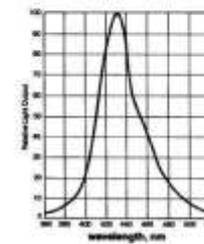
### China:

Saint-Gobain (Shanghai) Crystals Co., Ltd.  
1010, 1114, Dushan Road  
201203, Shanghai, P.R. China  
Tel: (86) 21 33 5514 9122  
Tel: (86) 21 33 5513 8884

www.saintgobain.com/gobain.com

## BC-525 Gd Loaded, Mineral Oil Based Liquid Scintillator

### Emission Spectrum –



Manufacturer reserves the right to alter specifications.  
©2007 Saint-Gobain Crystals & Plastics, Inc. All rights reserved.

03-030

# Gd-содержащие ЖС

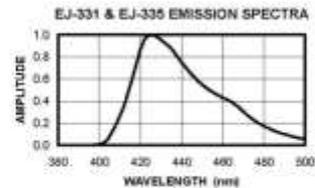
## EJ-331 and EJ-335 GADOLINIUM LOADED LIQUID SCINTILLATORS

The principal applications of these liquid scintillators are neutron spectrometry and neutrino studies. The neutron capture reaction in gadolinium produces a multiplicity of beta particles with a total energy of about 8 MeV. Delayed coincidence and pulse shape discrimination techniques are commonly employed with these liquids. Also, because they are often employed in large volumes both are formulated with high flash point solvents. The standard gadolinium loading is 0.5% by weight in EJ-331.

EJ-331, based on a fully aromatic solvent, provides the maximum light output consistent with long-term stability. It is also available with gadolinium loadings up to 1.5%. EJ-335 contains mineral oil substituted for some of the aromatic solvent for purposes of higher hydrogen content and higher flash point for use in very large tanks. In this case, 0.25% gadolinium loading is maximum, and 0.1% loading is common for very quantities.

PROPERTIES	EJ-331	EJ-335
Gadolinium content:	0.5% w/w	0.25% w/w
Specific Gravity:	0.90	0.89
Light Output (% of Anthracene)	68%	59%
Wavelength of Maximum Emission	424 nm	424 nm
Bulk Light Attenuation Length:	>4 meters	>4.5 meters
Refractive Index	1.50	1.49
Flash Point	44°C (111°F)	64°C (147°F)

ATOMIC COMPOSITION	EJ-331	EJ-335
No. of H Atoms per cm <sup>3</sup>	$5.27 \times 10^{22}$	$6.16 \times 10^{22}$
No. of C Atoms per cm <sup>3</sup>	$4.00 \times 10^{22}$	$3.93 \times 10^{22}$
H:C Ratio	1.32	1.57
No. of Electrons per cm <sup>3</sup>	$29.8 \times 10^{22}$	$30.6 \times 10^{22}$



Aug. 2009

	ELJEN TECHNOLOGY PO Box 870, 300 Crane Street Sweetwater TX 79556 USA	Tel: (325) 235-4278 or (800) 805-8771 Fax: (325) 235-0701 Website: <a href="http://www.eljontechnology.com">www.eljontechnology.com</a>
---	---	---

# Gd-содержащие ПС

[92]:

основное вещество – NE-120;  
Gd-содержащая добавка – бензоилацетонат.

[93]:

основное вещество – ПММА;  
Gd-содержащая добавка – ?.

TABLE 1

Calculated hydrogen to Gd capture ratio for 1 MeV neutrons

	0.033%	0.10%	0.20%	0.50%
Weight % Gd	0.033%	0.10%	0.20%	0.50%
H/Gd capture ratio	0.15	0.059	0.036	0.023

TABLE 2

Measured pulse height attenuation vs distance

	Relative Pu-alpha pulse height		
No Gd	1.0	0.79	0.57
0.1% Gd	0.42	0.29	0.21
0.2% Gd	0.15	–	–
Source to phototube distance	1 in	3 in	6 in

Характеристики пластмассового сцинтиллятора с гадoliniем

Исследуемые образцы		Световой выход		Эффективный коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup>	Время жизни сцинтилляции в образце, нс	Содержание гадолиния в образце, г/г	Эффективность регистрации нейтронов, %
№	размер	относительно сцинтиллятора на основе ПММА без Gd, %	относительно инверсии, %				
1	70×450	87	24	0,0168±0,0017	22,5±2	1,75±0,32	4,5±0,68
2	65×450	87	24	0,0168±0,0017	21±2	1,85±0,42	4,8±0,72
3	50×500	87	24	0,0152±0,0016	29±5	0,81±0,34	1,2±0,18
4	78×520	72	20	0,0085±0,0016	20,5±1,2	2,1±0,26	8,5±1,2

92. Gzirr J.B. // Nucl. Instr. & Methods, 1973, V. 108, P. 613.

93. Алешин В.И., Бакаляров А.М., Балыш А.Я. и др. // ПТЭ, 1977, № 4, С. 68.

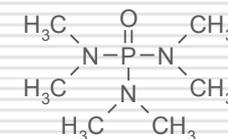
# Gd-содержащие ПС

Основное вещество – ПММА.

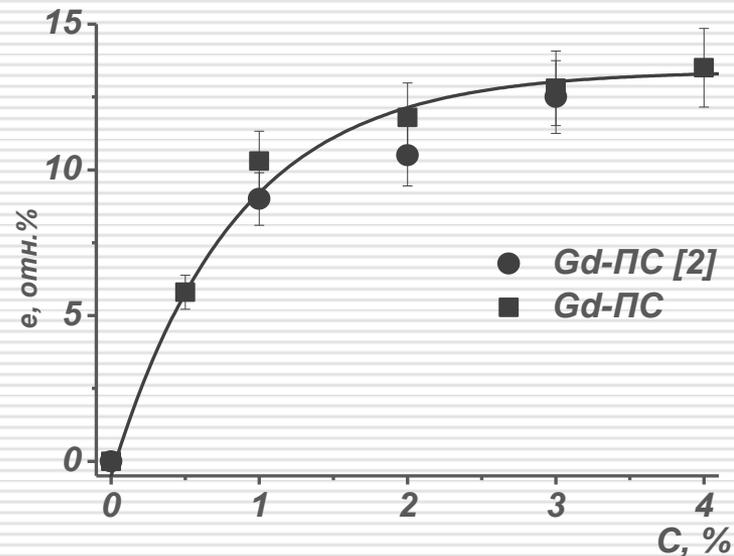
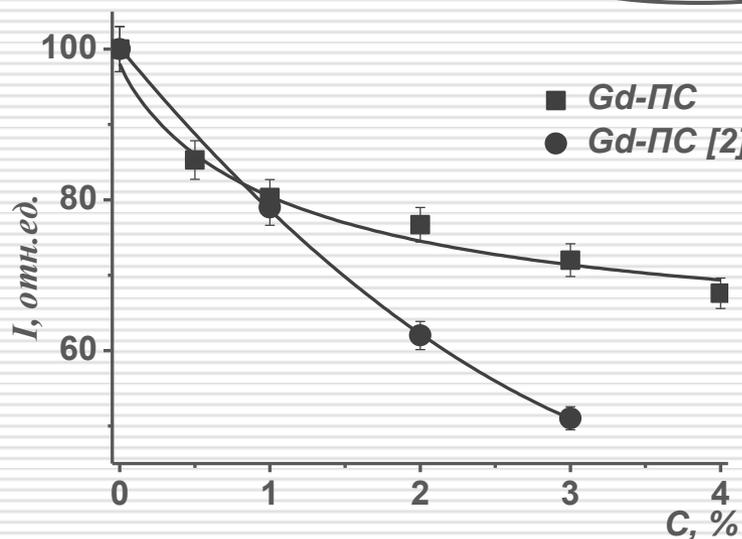
Gd-содержащие добавки – комплексные соединения нитрата [2] и хлорида гадолиния с гексаметилтриамидом фосфорной кислоты (НМРА).



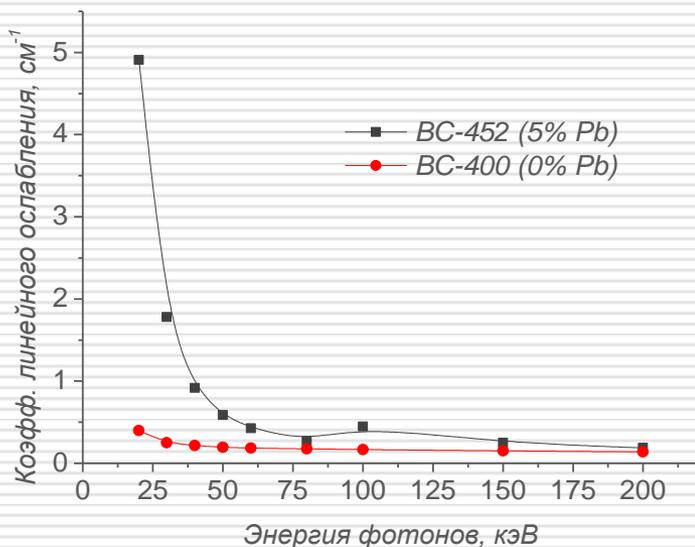
Массовая доля Gd до 4 %.



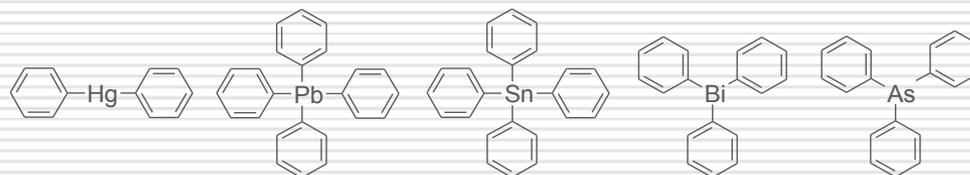
НМРА  
гексаметилтриамид  
фосфорной кислоты



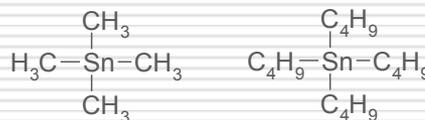
# ОС, содержащие тяжелые элементы



## Металлоорганические соединения ароматического ряда: [94 – 101]



## Металлоорганические соединения алифатического ряда: [102 – 104]



94. Basile L.J. // J. Chem. Phys., 1957, V. 27, No 3, P. 801.
95. Андреев В.А., Барони Е.Е., Курсанова Н.С., Розман И.М. // ПТЭ, 1961, № 4, 1961.
96. Барони Е.Е., Килин С.Ф., Лебсадзе Т.Н. и др. // Атомная энергия, 1964, Т. 17, В. 4, С. 497.
97. Чернобай А.В., Колесников Л.Н. // ПТЭ, 1964, № 2, С. 120.
98. Нагорная Л.Л., Чернобай О.А., Гундер О.А. и др. // В сб.: «Монокристаллы, сцинтилляторы и органические люминофоры», № 2, 1967, С. 72.
99. Гундер О.А., Коба В.С., Николова Э.П. // В сб.: «Монокристаллы и сцинтилляционные материалы», № 2, 1978, С. 95.
100. Патент РФ № 2080625.
101. Britvich G.I., Britvich I.G., Vasil'chenko V.G. et. al. // Nucl. Instr. & Methods, 1999, V. A426, P. 453.
102. Ashfold C.B., Berlman I.B., Flournoy J.M. et. al. // Nucl. Instr. & Methods, 1986, V. A243, P. 131.
103. Патент РФ № 2087009.
104. Hwang M.J., Kwon Y.J., Kim H.J. et. al. // Nucl. Instr. & Methods, 2007, V. A570, P.454.

# ОС, содержащие тяжелые элементы

## BC-452 Lead-loaded Plastic Scintillator

BC-452 detects low-energy (<100 keV) at high count rates, which makes it useful in such applications as Mossbauer spectroscopy and X-ray dosimetry. The standard material contains 5% lead by weight. The plastic incorporates the lead by means of organic-metallic chemistry which yields a clear scintillator. You can obtain other lead concentrations up to 10%.

### Scintillation Properties –

Light Output, %AmBe source	5% Loading	32
	2% Loading	48
	10% Loading	30
Decay Time, ns		1.1
Wavelength of Maximum Emission, nm		424

Light Attenuation Coefficients (cm<sup>-1</sup>/cm) Standard BC-452 (5% lead) and BC-400 (carbonized) Plastic Scintillator

Energy, keV	BC-452	BC-400
20	4.00	0.600
30	3.78	0.750
40	0.618	0.238
50	0.607	0.230
60	0.607	0.188
80	0.272	0.176
100	0.440	0.167
258	0.253	0.151
300	0.188	0.139

### General Technical Data –

Density, g/cm <sup>3</sup>	5% loading	1.08
	2% loading	1.05
	10% loading	1.27
Refractive Index		1.55
Softening Point		40°C

### World's Largest Provider of Quality Inorganic Crystals



### USA

Saint-Gobain Crystals  
12240 Alton Road  
Van Nuys, CA 91411  
Tel: (818) 704-2151  
Fax: (818) 704-8027

### Europe

Saint-Gobain Crystals  
129 Route de Lutzel  
49 511  
77164 Reims, France  
Tel: 33 (0) 3 46 43 79 28  
Fax: 33 (0) 3 46 43 10 01

### UK

Saint-Gobain Crystals  
1794 St. Helier  
St. Helier, Jersey

### Japan

Saint-Gobain KK, Crystal Division  
3-7, Higashi-4, Ohta-ku, Tokyo  
Tel: 81 (0) 3 5341 4159  
Fax: 81 (0) 3 5341 2056

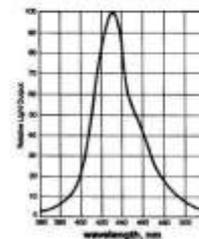
### China

Saint-Gobain (China) Invention Co., Ltd.  
15-01, 011K, Suning  
25 Zhongyuan Road  
Wujiaochang, China  
Tel: 86 (0) 53 801 3 0143  
Fax: 86 (0) 53 801 3 0143

[www.saint-gobain.com](http://www.saint-gobain.com)

## BC-452 Lead-loaded Plastic Scintillator

### Emission Spectrum –



Manufacturer reserves the right to alter specifications.  
©2005 Saint-Gobain Crystals & Plastics, Inc. All rights reserved.

80-400



# ОС, содержащие тяжелые элементы

## BC-551 Lead Loaded Liquid Scintillator

BC-551 is a xylene-based scintillator which contains 5% lead by weight. This clear homogeneous liquid yields much higher X-ray and gamma sensitivity than unloaded liquid or plastic scintillators, particularly for photon energies below 200 keV. It comes encapsulated in ready-to-use glass or metal cells or in bulk, bottled under inert gas, for transfer to your containers.

### Scintillation Properties –

Light Output, % Aerovoxene ..... 81  
Wavelength of maximum emission, nm ..... 425  
Decay time, ns ..... 3

### Linear Attenuation Coefficients, cm<sup>-1</sup>

Energy, keV	BC-551	Unloaded liquid
18	7.875	3.898
25	5.810	3.674
28	5.810	3.582
38	4.822	3.108
60	3.387	2.172
88	2.335	1.518
100	2.018	1.447
150	1.215	0.933
200	0.749	0.622

### Atomic Composition –

No. of H Atoms per cc .....  $4.74 \times 10^{23}$   
No. of C Atoms per cc .....  $7.82 \times 10^{23}$   
No. of Pb Atoms per cc .....  $1.91 \times 10^{23}$   
No. of electrons per cc .....  $2.82 \times 10^{24}$

### General Technical Data –

Density (20°C) ..... 1.02 g/cc  
Refractive Index ..... 1.520  
Flash point ..... 24°C

### Scintillation Products Liquid Scintillators



### USA

Saint-Gobain Crystals  
12200 Woodloch Road  
Houston, TX 48037  
Tel: (281) 366-2212  
Fax: (281) 366-8047

### Europe

Saint-Gobain Crystals  
324 Route de Courmayeur  
BP 221  
17700 Melle-sur-Seudre, France  
Tel: (33) 02 49 46 30 00  
Fax: (33) 02 49 46 30 05

### P.O. Box 9000

47160 Oak Grove  
The Woodlands, TX  
Tel: (281) 366-2212  
Fax: (281) 366-8047

### Japan

Saint-Gobain K.K., Crystal Division  
6-5, Nishimachi, Chiyoda-ku,  
Tokyo 102-8602, Japan  
Tel: (81) 3 5561 3500  
Fax: (81) 3 5561 3246

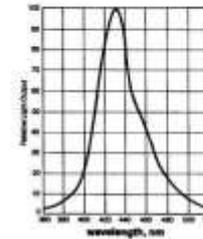
### China

Saint-Gobain (China) Instrumental Co., Ltd.  
22-02 CIFIC BUILDING  
22 Jiangqian Avenue  
Nanjing, 210004, China  
Tel: (86) 25 82 5111 0511  
Fax: (86) 25 82 5111 0502

[www.saintgobain.com](http://www.saintgobain.com)

## BC-551 Lead Loaded Liquid Scintillator

### Emission Spectrum –



SAINT-GOBAIN  
CRYSTALS

Saint-Gobain reserves the right to alter specifications.  
©2005 Saint-Gobain Ceramics & Polymers, Inc. All rights reserved.

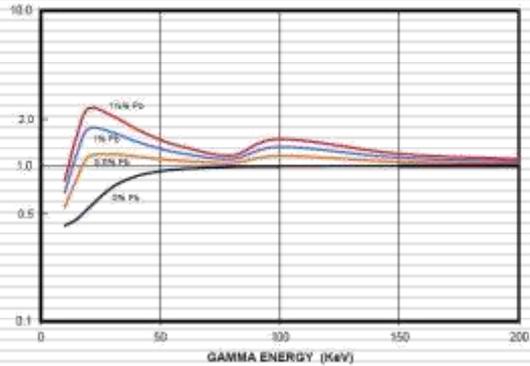
05-09



# ОС, содержащие тяжелые элементы

## EJEN TECHNOLOGY

GAMMA ATTENUATION OF EJ-256 LEAD-LOADED PLASTIC SCINTILLATORS COMPARED TO WATER  
RATIO OF LINEAR ATTENUATION COEFFICIENTS



EJ-256 PHYSICAL CONSTANTS

	5% Pb	2% Pb	15% Pb	1% Pb	0.5% Pb	0% Pb
L.O. % antineutrino	34%	47%	50%	53%	56%	66%
L.O. Photons/MeV	6,300	7,300	7,500	8,100	8,600	10,000
Density	1.081 g/cc	1.104 g/cc	1.059 g/cc	1.030 g/cc	1.021 g/cc	1.023 g/cc
KeV	g	g	g	g	g	g
10	0.96	4.75	4.07	3.41	2.76	2.10
15	6.56	2.56	2.38	1.82	1.26	0.70
20	4.93	2.14	2.09	1.29	0.820	0.385
30	1.80	0.843	0.688	0.530	0.389	0.239
40	0.935	0.485	0.413	0.344	0.275	0.205
50	0.591	0.345	0.306	0.267	0.229	0.191
60	0.426	0.277	0.253	0.230	0.207	0.183
80	0.287	0.216	0.205	0.194	0.183	0.172
100	0.452	0.275	0.246	0.219	0.191	0.164
150	0.251	0.187	0.177	0.167	0.157	0.147
200	0.186	0.155	0.150	0.145	0.140	0.135
300	0.096	0.092	0.091	0.090	0.090	0.085
600	0.0914	0.0876	0.0870	0.0865	0.0860	0.0855
1250	0.0664	0.0642	0.0638	0.0636	0.0633	0.0630

