

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова, В.И. Гуренцов,  
В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова, Е.А. Янович

Способ очистки жидкого органического сцинтиллятора  
на основе ЛАБа от микропримесей урана,  
тория и калия-40

препринт  
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1397/2015  
ФЕВРАЛЬ 2015

МОСКВА 2015 MOSCOW

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук



И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова, В.И. Гуренцов,  
В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова, Е.А. Янович

Способ очистки жидкого органического сцинтиллятора  
на основе ЛАБа от микропримесей урана,  
тория и калия-40

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН  
1397/2015  
ФЕВРАЛЬ 2015

МОСКВА  
2015

Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences  
60-th October Anniversary prospect 7a,  
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
проспект 60-летия Октября, 7а  
Москва, 117312

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,  
В.И. Гуренцов, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,  
Е.А. Янович

Способ очистки жидкого органического  
сцинтиллятора на основе ЛАБа  
от микропримесей урана,  
тория и калия-40

Исследована возможность очистки жидкого органического сцинтиллятора на основе линейного алкилбензола (ЛАБ) от урана, тория и калия методом водной экстракции. Показано, что соотношение объемов сцинтиллятора и воды во время водной экстракции должно составлять не менее 1:5. Прозрачность ( $L_{420}$ ) ЛАБа после водной обработки не изменяется и равна  $13,0 \pm 1,8$  м. Определена растворимость воды в ЛАБе, и растворимость ЛАБа в воде, равные 46 ppm и 5,1 ppm, соответственно.

И.Р. Барабанов, Л.Б. Безруков, А.В. Вересникова,  
В.И. Гуренцов, В.П. Моргалюк, Г.Я. Новикова,  
Е.А. Янович

Способ очистки жидкого органического  
сцинтиллятора на основе ЛАБа  
от микропримесей урана,  
тория и калия-40

Препринт 1397/2015

Февраль 2015

Подписано в печать 01.02.2015

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,0. Зак. 22345 Тираж 50 экз.  
Бесплатно

Печать цифровая  
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-284-3

© Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований  
Российской академии наук, 2015  
Institute for Nuclear Research  
of the Russian Academy of Sciences, 2015

## Введение

Жидкие органические сцинтилляторы широко используются в нейтринной физике и астрофизике для регистрации редких событий. Программа нейтринных экспериментов включает регистрацию и измерение потоков нейтринного излучения от таких источников, как Солнце, Сверхновые, ядерные реакторы или естественные радиоактивные изотопы, содержащиеся в коре и мантии Земли (геонейтрино).

Несмотря на большую массу мишени (от сотен до тысяч тонн), вероятность нейтринных взаимодействий очень низкая и, как правило, находится в диапазоне от нескольких событий в день или в год, в зависимости от источника и энергии нейтрино.

Для надежной регистрации редких событий в жидких органических сцинтилляторах, крайне важно, исключить или свести к минимуму фоновые события, имитирующие нейтринные взаимодействия в сцинтилляторе. Такие фоновые события могут быть обусловлены воздействием космических лучей, внешней радиоактивностью окружающей среды, включая конструкционные материалы, а также радиоактивными загрязнениями, содержащимися в самом сцинтилляторе. От первых двух источников фона можно защититься, размещая сцинтилляционные детекторы глубоко под землей, в специальной низкофоновой лаборатории. Внутренний фон сцинтиллятора, связанный с растворёнными примесями радиоактивных элементов, таких как природные изотопы урана, тория, калия, по-прежнему, остается актуальной проблемой.

Впервые концепция глубокой очистки сцинтиллятора от радиоактивных примесей была предложена и продемонстрирована коллаборацией Борексино [1] в тестовом модуле Counting Test Facility (CTF) массой ~5 т [2-6], и затем применена в полномасштабном детекторе Борексино (300т). Подобная технология очистки используется также в эксперименте KamLAND (1000т) [7]. Борексино продемонстрировало возможности очистки сцинтиллятора на основе псевдокумола (PC). На установке CTF была также исследована методика очистки фенилксилилэтана (PXE)[6] – как возможной альтернативы PC. В эксперименте KamLAND

необходимый уровень чистоты был достигнут для сцинтиллятора на основе смеси растворителей: 20% РС и 80% додекана [7].

В настоящее время рассматриваются новые эксперименты [8-10], для которых требуются сцинтилляторы значительно больших объемов. Экспериментальные требования к установкам ставят задачи улучшения оптических и сцинтилляционных характеристик детекторов. Также необходимо учитывать возросшие требования к экологической и пожарной безопасности при проектировании подобных установок. Для этих целей более предпочтителен линейный алкилбензол (ЛАБ), который изначально имеет большую прозрачность, чем псевдокумол, более высокую температуру вспышки и производится в промышленных масштабах по доступной цене. В таблице 1 для сравнения приводятся свойства ЛАБа и других растворителей, используемых в настоящее время в органических сцинтилляторах большого объема.

Таблица 1. Растворители, применяемые в сцинтилляторах большого объема

Растворитель	D g/ml	n <sup>20</sup>	H at/ml	LY	Flash Point	T <sub>кип</sub> °C	L <sub>420</sub> M	Конц. U,Th 10 <sup>-12</sup> g/g
White spirit [11]	0,790				33 °C	65		
PC	0,889	1,504	5,35·10 <sup>22</sup>	1	48 °C	169,3	3.1[6] 7.4(dist)	U<5[6] Th<5[6]
LAB	0,856	1,482	6,26·10 <sup>22</sup>	0,76	130 °C	280-311	15.7±1,8	Th<0.1 U<0.2[12]
PXE	0,985	–	5,08·10 <sup>22</sup>	0,87	167 °C	295		
Додекан	0,75	1,422	6,89·10 <sup>22</sup>	0,40	71 °C	216		

Из таблицы 1 видно, что начальная прозрачность отечественного ЛАБа в разы превосходит прозрачность псевдокумола, используемого в эксперименте Борексино, при том, что содержание урана и тория в РС и в ЛАБе находится примерно в одних и тех же пределах (измерено на ICPMS). Известно, что уран и торий в окружающей среде, как правило, существуют в виде соединений, нерастворимых в органических растворителях, но они могут попадать в сцинтиллятор с мельчайшими частицами пыли или из конструкционных материалов. Радиоактивный калий-40, входящий в естественную смесь изотопов калия, в окружающей среде существует в форме солей, растворимых в воде, и может попадать в органический сцинтиллятор вместе с водой (растворимость воды в ЛАБе см. ниже) или по тем же каналам, что уран и торий. Но основное его количество, как показано в эксперименте Борексино, заносится в сцинтиллятор вме-

сте с РРО (2,5-дифенилоксазолом). Методом нейтроноактивационного анализа [6] определено, что в РРО содержится  $2 \cdot 10^{-6}$  г/г калия-40.

Поскольку концентрация радиоактивных примесей в ЛАБе крайне мала (см. табл.1), и мы не имеем возможности анализировать её в лаборатории на таком уровне, было решено предварительно ввести в ЛАБ достаточные для анализа в самом сцинтилляторе количества урана, тория и калия, а затем разработать методику их выделения.

Таким образом, данная работа посвящена разработке методики экстракции в ЛАБ и реэкстракции из ЛАБа таких радиоактивных элементов, как уран, торий и калий-40, а также исследованию влияния этой процедуры на прозрачность и химический состав ЛАБа.

### Экспериментальная часть

На настоящее время разработаны экстракционные технологии выделения урана и тория из жидких радиоактивных отходов с использованием нейтральных комплексообразующих органических и фосфорорганических реагентов [13-15]. Как правило, в них имеют дело с более концентрированными растворами и применяются экстракционные системы на основе других растворителей. При этом не возникает проблема радиоактивной чистоты реагентов, используемых для реэкстракции урана и тория из органической фазы. В нашем случае при разработке методики реэкстракции необходимо выбирать такие реагенты, которые бы сами не заносили в ЛАБ радиоактивные примеси, что безусловно сужает выбор возможных методик эффективного выделения урана и тория из ЛАБа.

Для введения в ЛАБ, как урана, так и тория мы использовали жидкостную экстракцию с применением триоктилфосфинооксида (ТОРО) в качестве реагента, образующего с торием и уранил-ионом комплексные соединения, хорошо растворимые в органических растворителях.

### Очистка ЛАБа от урана

Для введения урана использовали водный раствор нитрата уранила  $UO_2(NO_3)_2$ , с концентрацией  $C=0,014$  моль/л. Уран экстрагировали с помощью раствора ТОРО в ЛАБе ( $C=0,02$  моль/л), исходя из мольного отношения между ионом  $UO_2^{+2}$  и ТОРО 1:3 [13]. Отношение водной и органической фаз взято 1:1. Для улучшения условий экстрагирования использовали высаливатель LiCl в количестве, при котором концентрация его в экстрагируемом водном растворе составляла 6 моль/л.

Экстракцию производили встряхиванием 5 мл 0,014 моль/л водного раствора  $UO_2(NO_3)_2$  с 10 мл 0,021 моль/л раствора ТОРО в ЛАБе и 5 мл 12 М раствора LiCl. Время контакта фаз 3 мин. После разделения органической и водной фазы, отбирали на анализ 5 мл органической фазы, в которую предварительно добавляли PPO (из расчета 2г/л) и bis-MSB (0,02 г/л).

Активность урана в пробе ЛАБа (5 мл) составила 75 Бк. На рис.1 изображен спектр U-238 от распада альфа частицы с энергией 4.2 МэВ.

После вторичной экстракции из отделенной водной фазы, проведенной при тех же условиях, что и первичная, активность ЛАБа составила 0,6 Бк. Таким образом, эффективность первичной экстракции комплекса уранила в ЛАБ оказалась равной – 99,2%.

Как известно [14], для рекстракции урана из органики лучшим реагентом является гидрокарбонат аммония, образующий с ураном устойчивый комплекс аммонийуранилтрикарбонат  $(NH_4)_4(UO_2CO_3)_3$ , который способен легко переходить в водную фазу. Но для данной задачи (ультранизкое содержание радиоактивных элементов в сцинтиляторе) введение лишних реактивов в ЛАБ нежелательно, так как сами они могут являться источником радиоактивных приме-

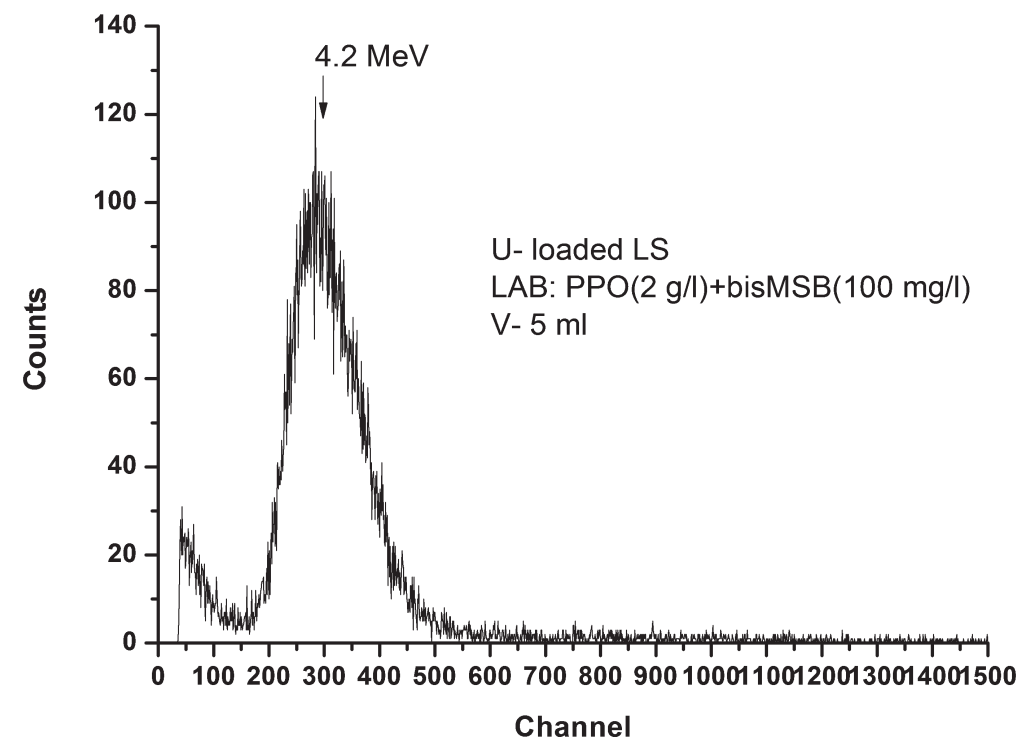


Рис.1.

Спектр урана в жидком сцинтиляторе на основе ЛАБа (PPO(2 г/л), bis-MSB(20 мг/л))

сей. Так, например, в составе гидрокарбоната может находиться повышенное, по сравнению с ЛАБом, содержание изотопа  $^{14}C$ , что в результате может привести к увеличению концентрации радиоуглерода в ЛАБе за счёт механизма ионного обмена. Поэтому для демонстрации методики очистки ЛАБа от урана, а также тория и калия использовалась чистая деионизованная вода.

Проведённые эксперименты показали, что при соотношении объемов ЛАБа и воды равном 1:1, эффективность водной экстракции, как метода очистки от урана, составила 31 %, а при соотношении ( $V_{орг.} : V_{вод.} = 1:5$ ) – 99 %. Содержание урана в ЛАБе анализировалось по измерению активности в образце жидкого сцинтиллятора.

### Очистка ЛАБа от тория

Для введения тория в раствор ЛАБа использовали первоначальный водный раствор  $Th(NO_3)_4$  с концентрацией 0,039 моль/л. Для проведения экстракции 5мл этого раствора помещали в делительную воронку, добавляли к нему 5мл 12М раствора LiCl и 10 мл раствора ТОРО в ЛАБе ( $C=0,059$  моль/л)). Мольное соотношение между ионом тория и ТОРО равно 1:3. Время контакта фаз 10 мин.

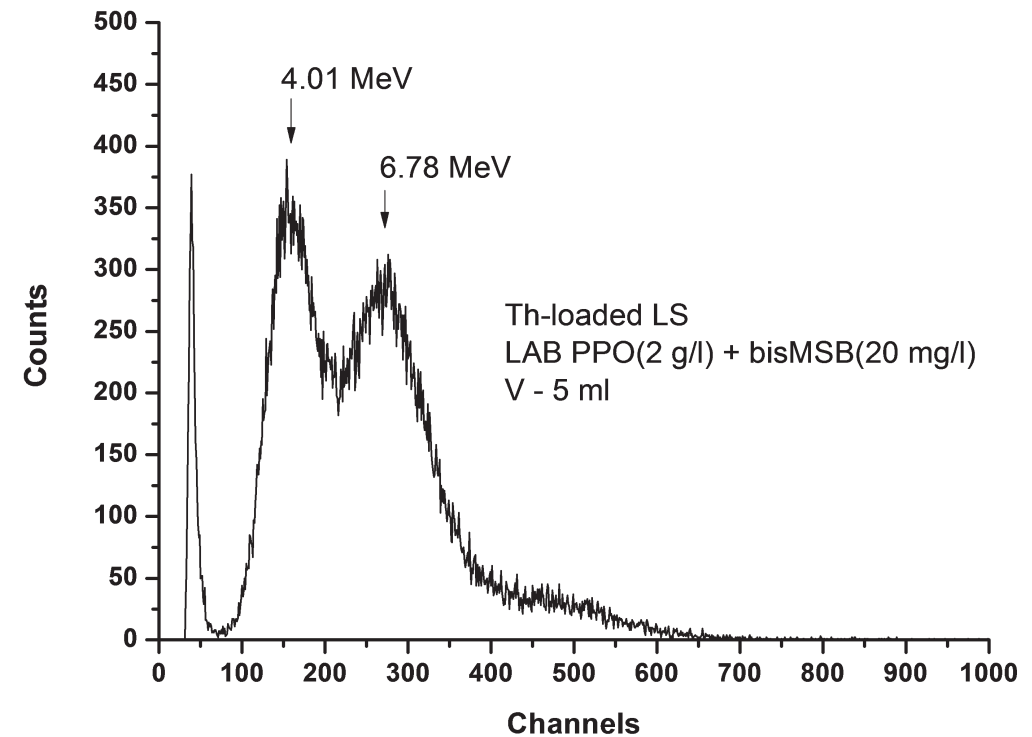


Рис.2

Спектр Th в жидком сцинтиляторе на основе ЛАБа (PPO(2 г/л), bis-MSB(20 мг/л))



После отделения водной фазы, анализировалось содержание тория в ЛАБе. С этой целью, как и в случае с ураном, была приготовлена проба сцинтиллятора с PPO (2 г/л) и bis-MSB(0,02г/л).

На рис.2 изображён амплитудный спектр тория и его дочерних продуктов в сцинтилляторе объёмом 5 мл. Активность пробы сцинтиллятора (5 мл) составила 266 расп./сек.

Для очистки ЛАБа от тория была использована, как и для урана, деионизованная вода, в соотношении 1:5. При этом отношении органической и водной фаз эффективность реэкстракции тория составила 97%.

Таким образом, было показано, что как для уранил-иона, так и для тория чистая деионизованная вода является хорошим средством для извлечения их из ЛАБа. При этом, согласно полученным результатам, соотношение объёмов ЛАБа и воды должно составлять не менее 1:5.

#### Очистка ЛАБа от калия

Концентрация радиоактивного изотопа К-40 в природном калии составляет 0.0117 %. К-40 может распадаться двумя путями: путем бета-распада с энергией  $E_{\max} - 1.314$  МэВ (89 %) и электронного захвата (11 %) с излучением гамма кванта 1.46 МэВ.

Основными источниками калия в сцинтилляторе могут являться, как и в случае урана и тория, пыль из окружающего воздуха, а также вода, растворимая в ЛАБе, и калийные соли высших жирных кислот, фенолов и подобных им соединений, растворимых в органических растворителях.

В эксперименте Борексино был выполнен анализ содержания калия в сцинтилляторе. Было показано, что основным источником К-40 является сцинтилляционная добавка PPO. Возможно, калий находится в PPO в виде примеси, связанной с методом его синтеза. Для очистки PPO от калия в эксперименте Борексино используется вакуумная дистилляция раствора PPO в псевдокумоле. Как было отмечено, ЛАБ имеет значительно более высокую температуру кипения (~ 300 С). Поэтому, в нашей работе было проведено исследование методики водной экстракции для очистки ЛАБа от калия.

Для введения калия-40 в ЛАБ была разработана методика с использованием 3,5,5-триметилгексановой кислоты (ТМНА). Для этого был приготовлен 2 М раствор ТМНА в ЛАБе, после чего проводили нейтрализацию ТМНА эквимольным раствором КОН.

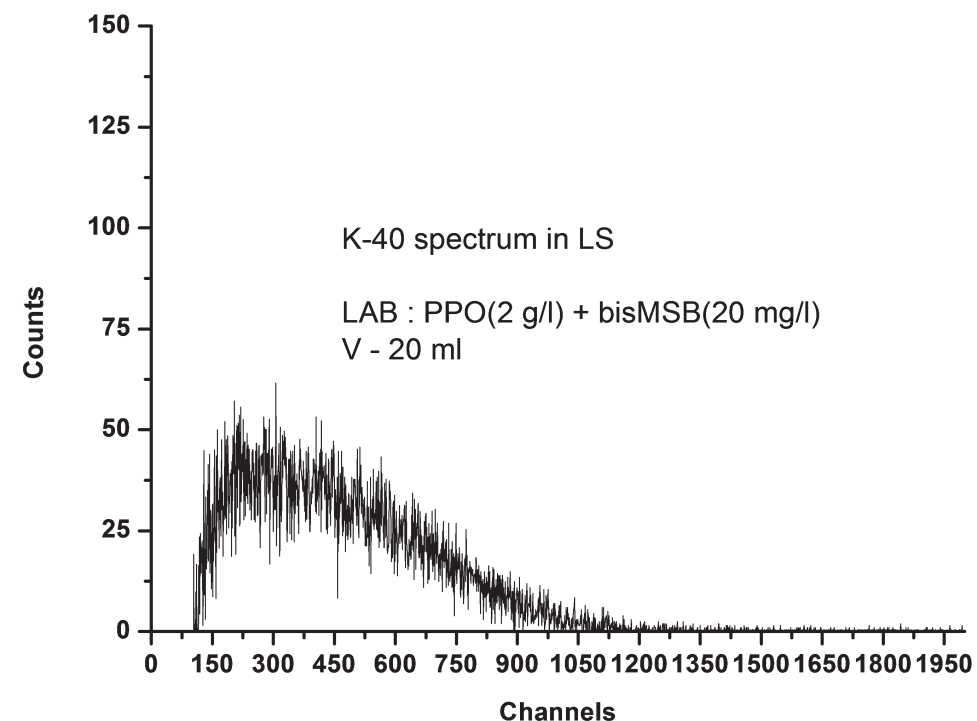


Рис.3

Бета-спектр 40К в сцинтилляторе на основе ЛАБа (PPO(2 г/л), bis-MSB(20 мг/л))

После разделения слоев на анализ отбирали 20 мл раствора ЛАБа, в который добавляли 0,04 г PPO и 0,0004г bis-MSB.

На рис.3 показан бета-спектр  $^{40}\text{K}$  в сцинтилляторе на основе ЛАБа (PPO (2 г/л), bis-MSB (20 мг/л)).

Для очистки ЛАБа от калия-40 была использована экстракция деионизованной водой, при соотношении объёмов ЛАБа и воды равном 1:2. Измерения активности и сцинтилляционных характеристик ЛАБа показали, что практически весь (~ 100%) калий переходит из органической фазы в водную.

#### Исследование прозрачности ЛАБа после водной промывки и определение растворимости ЛАБа в воде и воды в ЛАБе

После того, как было показано, что реэкстракция водой эффективно удаляет уран, торий и калий из ЛАБа, было исследовано также влияние этой процедуры на прозрачность и химический состав ЛАБа. Была проведена реэкстракция больших количеств ЛАБа (500 мл) деионизованной водой при использовании перемешивающего устройства в течение 2-ух часов. ЛАБ последовательно промывали 3 раза по 500 мл водой и после каждой операции отбирались пробы как ЛАБа, так и воды после промывки. Расслаивание водной и органической фаз осуществ-

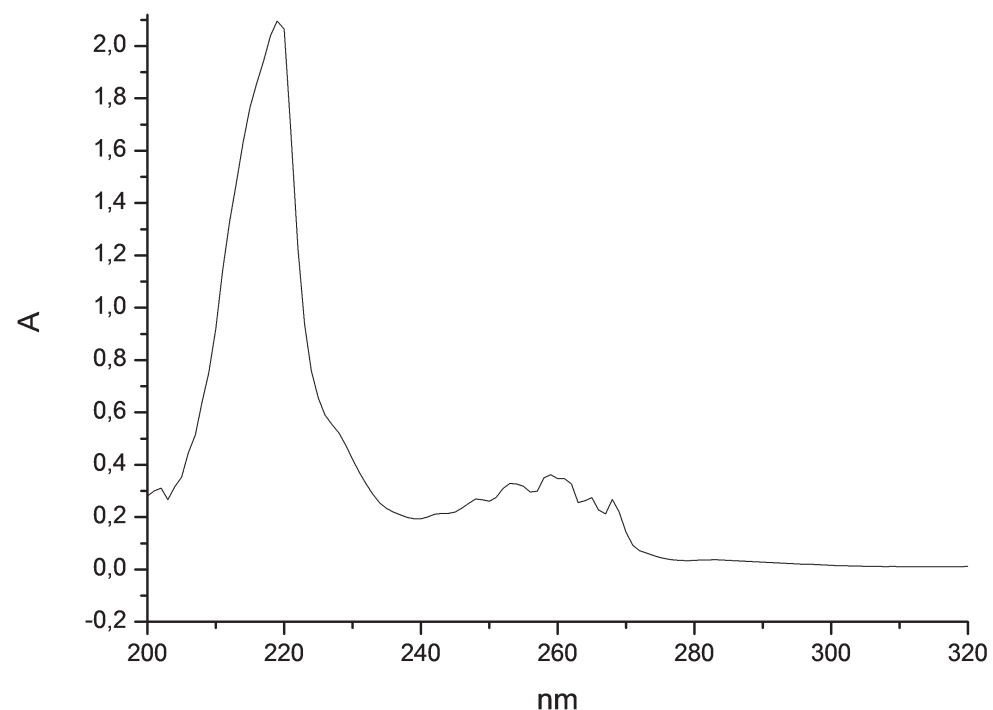


Рис.4

УФ-спектр ЛАБа в гексане в 10 см кювете, после концентрирования его из водной фазы

влялось в течение суток. После этого измерялась прозрачность как ЛАБа, так и водной фазы.

Прозрачность ЛАБа измерялась на спектрофотометре Perkin Elmer Lambda 35 по методике, ранее разработанной авторами [16]. Измерения проводились в 10см кювете по отношению к пустой кювете, и прозрачность (attenuation length) считалась по формуле  $L_{420} = 10/2,3(A_{420} - A_{min})$ , где

$A_{420}$  – значение поглощения света при 420 нм,

$A_{min}$  – минимальное поглощение света в области 500-600нм.

Следует заметить, что при хорошей прозрачности ЛАБа, когда значения поглощения близки к пределу чувствительности спектрофотометра ( $A=0,002$ ), возрастает статистическая погрешность измерений, поэтому измерения каждого образца выполняли по 5-6 раз. Для исходного ЛАБа значение прозрачности при 420 нм составляет  $L_{420} = 15,7 \pm 1,8$  м, для ЛАБа, промытого водой, значение прозрачности при 420 нм –  $L_{420} = 13,0 \pm 1,8$  м,

Таким образом, можно считать, что прозрачность ЛАБа после промывки деионизованной водой практически не изменяется.

Для определения растворимости ЛАБа в воде были зарегистрированы УФ-спектры водной фазы по отношению к чистой воде. (Измерения выполнены в

10 см кюветах). Поскольку в спектрах водной фазы четких сигналов не зарегистрировано (только небольшой перегиб в области поглощения ЛАБа), растворенный в воде ЛАБ был сконцентрирован с помощью экстракции его в гексан. Для экстракции было взято 400 мл водной фазы, которая использовалась для промывки ЛАБа, и 40 мл гексана. Экстракцию проводили в течение 6 минут в делительной воронке. После разделения фаз был зарегистрирован УФ-спектр органической фазы по отношению к чистому гексану в 10 см кювете. На спектре явно видны сигналы, соответствующие ЛАБу (рис.4). Основные полосы поглощения ЛАБа связаны с полосами поглощения бензольного цикла в ближней (209-220нм) и дальней ультрафиолетовой области (240-280нм) (типичная бензольная гребенка).

Для определения концентрации ЛАБа, были определены коэффициенты экстинкции ЛАБа в гексане. Для этого были приготовлены растворы сравнения ЛАБа в гексане с концентрациями  $2,75 \cdot 10^{-4}$  –  $8,75 \cdot 10^{-4}$  моль/л и сняты их спектры.

Из спектров ЛАБа при этих концентрациях в области 200-320 нм (рис. 5) и полученной номограмме (рис. 6), соответствующей зависимости поглощения

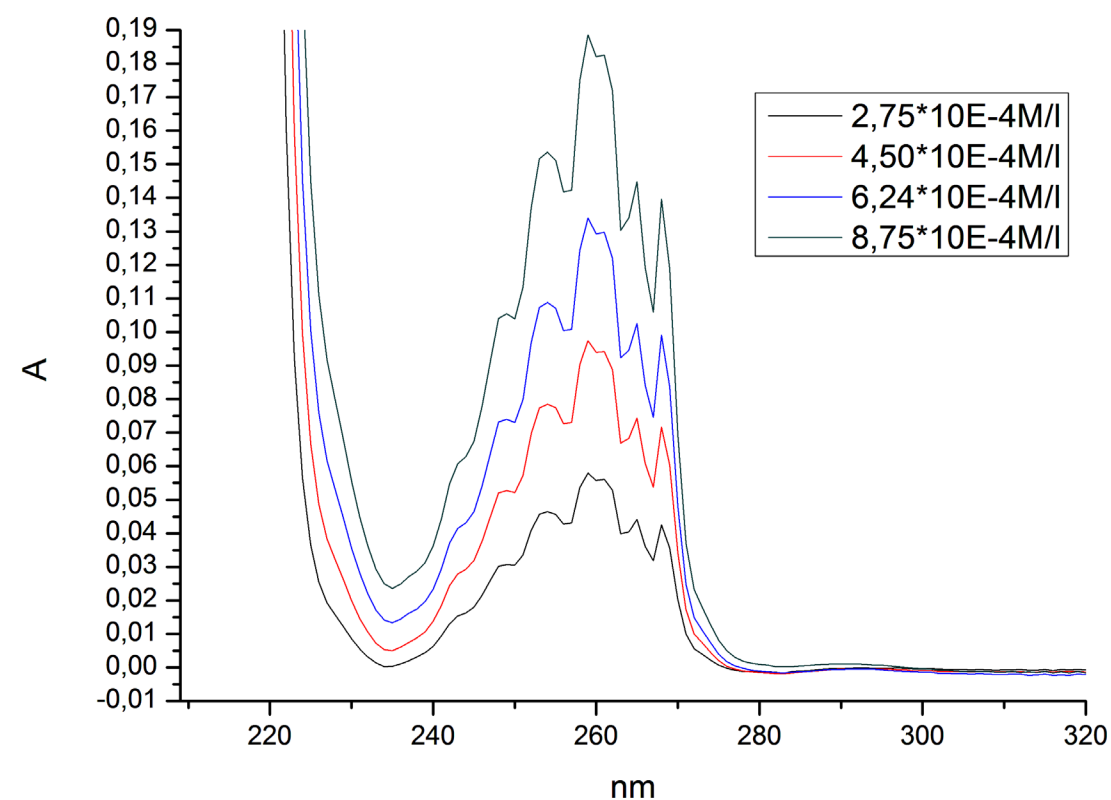


Рис. 5

УФ-спектры ЛАБа в гексане в области 200-320нм в 1 см кювете

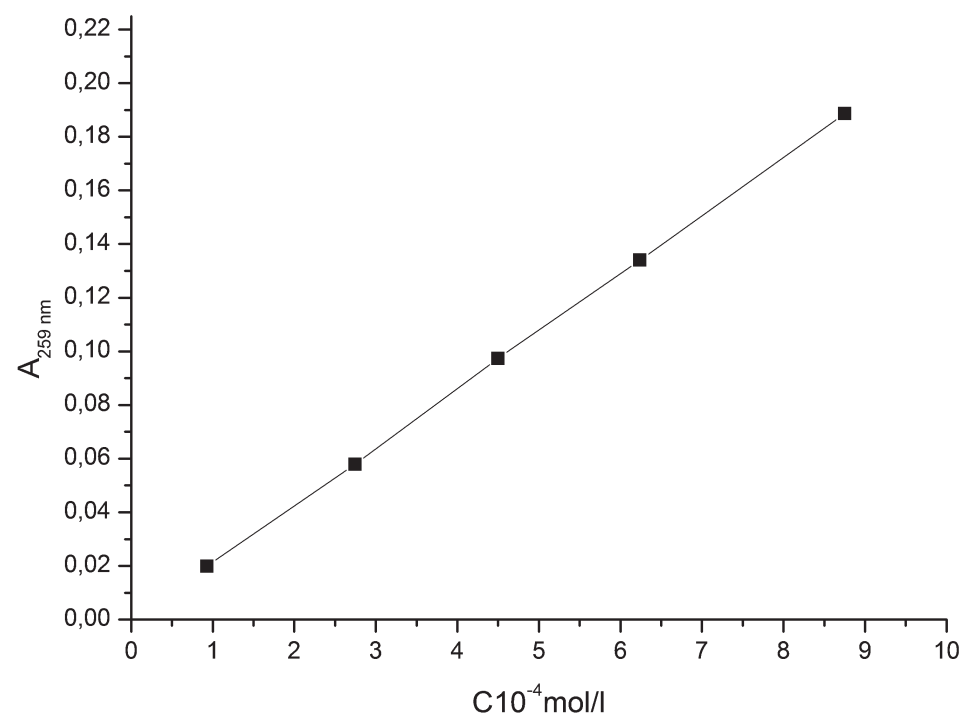


Рис.6

Зависимость поглощения (A) ЛАБа от концентрации в гексане при 259 нм

ЛАБа от концентрации, видно, что поглощение ЛАБа подчиняется закону Бера. Из номограммы на рис.6 следует, что коэффициент экстинкции (поглощение на 1 моль ЛАБа) при 259 нм (максимум в этой полосе поглощения) равен  $\epsilon=200$ , (что соответствует литературным данным для бензола в максимуме этой полосы поглощения [16, с.90]).

Отсюда, исходя из этого коэффициента, можно вычислить концентрацию ЛАБа в гексане по формуле:

$$C = A_{259}/d \cdot \epsilon, \text{ где}$$

$A_{259}$  – поглощение ЛАБа в гексане при 259 нм ( $A=0,3626$ , из спектра на рис.4).

$d$  – длина кюветы

$\epsilon$  – коэффициент экстинкции ЛАБа при 259 нм.

$$C = 0,3626/10 \cdot 200 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ моль/л,}$$

С учетом того, что растворенный в гексане ЛАБ был сконцентрирован в 10 раз, истинная его растворимость в воде равна  $C = 1,8 \cdot 10^{-5}$  моль/л.

Исходя из средней молярной массы ЛАБа  $M=242,14$  г/моль, известной из определенного нами ранее химического состава ЛАБа [16], находим  $C=0,0044$  г/л.

С учетом плотности ЛАБа (0,856 г/мл) растворимость ЛАБа в воде составляет 0,00051% или 5,1 ppm.

Вероятно, в воду могут переходить также примеси, содержащиеся в ЛАБе, например, производные диенов или ненасыщенных альдегидов и кетонов, которые характеризуются интенсивной полосой  $\pi \rightarrow \pi^*$  перехода в области 217-260 нм ( $\epsilon \approx 10000$ ) и полосой  $n \rightarrow \pi^*$  перехода при 320 нм ( $\epsilon \approx 100$ ) [17, стр.109]. Но концентрация этих примесей в ЛАБе не больше  $10^{-4}$  моль/л [16], поэтому, несмотря на очень высокий коэффициент экстинкции, вклад их в суммарный спектр ЛАБа, растворенного в гексане при малых концентрациях, очевидно, будет незначителен. Но, тем не менее, эти примеси также будут влиять на прозрачность самого ЛАБа, не разбавленного гексаном. В спектре ЛАБа (2 см кювета), заметен явный сигнал при 320 нм [16], (в спектре бензола такого сигнала нет), что также говорит в пользу того, что в ЛАБе есть примеси ненасыщенных альдегидов и кетонов.

Отсюда можно сделать вывод, что промывка водой может выводить из ЛАБа не только радиоактивные примеси, такие как уран и торий, но и некоторые органические примеси — например, производные ненасыщенных соединений, на присутствие которых указывает бромный индекс, указанный в сертификате продажного ЛАБа, равный 15 мг  $\text{Br}_2$  на 100 г продукта. В пересчете на мольную концентрацию это соответствует  $8 \cdot 10^{-4}$  моль/л ненасыщенных соединений в ЛАБе.

Содержание воды в ЛАБе до и после промывки водой, и после пропускания через колонку с оксидом алюминия определено по методу Карла Фишера (см. табл. 2).

Табл.2 Содержание воды в ЛАБе

N	ЛАБ исх. % воды	ЛАБ после Промывки водой % воды	ЛАБ после промывки и пропускания через $\text{Al}_2\text{O}_3$ % воды
1	0,0033	0,0044	0,0037
2	0,0035	0,0048	0,0039

Из таблицы 2 видно, что после промывки водой содержание воды в ЛАБе немного увеличивается по сравнению с исходным (34 ppm), и в среднем составляет 46 ppm.

В эксперименте Борексино для очистки от радиоактивности используется также дистилляция при пониженном давлении ( $T=125^\circ\text{C}$ , давление 100 torr). Однако, в нашем случае перегонка ЛАБа нежелательна, поскольку его температура кипения значительно выше, чем у псевдокумола. После перегонки при пониженном давлении прозрачность ЛАБа не увеличивается, а наоборот уменьшается.



Таким образом, наши исследования показали, что для удаления радиоактивных примесей (U, Th,  $^{40}\text{K}$ ) из ЛАБа оптимальным методом является промывка его деионизованной водой при соотношении объемов ЛАБа и воды не меньше 1:5. Прозрачность ЛАБа после водной экстракции практически не изменяется и равна  $13,0 \pm 1,8\text{м}$ . Содержание воды в ЛАБе после промывки составляет 46 ppm. Содержание ЛАБа в воде  $-5,1$  ppm.

Работа поддержана грантами РФФИ № 14-22-03059 и № 13-02-92440.

Авторы выражают благодарность Н.И.Бакулиной за помощь в экспериментальной работе и В.Н. Гаврину и Е.П. Веретенкину за предоставленную возможность регистрации УФ-спектров ЛАБа на спектрофотометре PerkinElmer Lambda 35.

### Литература

1. G. Alimonti *et al.* (Borexino Collaboration), *Astropart. Phys.* 16 (2002) 205-234
2. G. Alimonti *et al.* (Borexino Collaboration), *Nucl. Inst. Meth. A* 406 (1998) 411-426
3. G. Alimonti *et al.* (Borexino Collaboration), *Phys. Lett. B* 422 (1998) 349-358
4. G. Alimonti *et al.* (Borexino Collaboration), *Astropart. Phys.* 8 (1998) 141-157
5. H.O.Back *et al.* arXiv: physics/0408032[physics-det] 27 Sep. 2007
6. J.B.Benziger, Michael Johnson, F.P.Calaprince, M.Chen, N.Darnton, R.Looser, R.B.Vogelaar. A scintillator purification system for a large scale neutrino experiment, *Nucl. Instr. and Methods A* 417 (1998) 278-296.
7. K. Eguchi *et al.* (KamLAND Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 90 (2003) 021802
8. F.L.Villante, CNO solar neutrinos: a challenge for gigantic ultra-pure liquid scintillator detectors. arXiv:1410.2796v1, hep-ph 10 Oct2014
9. John G. Learned, Stephen T. Dye and SandipPakvasa, Hano-Hano: A deep ocean anti- neutrino detector for unique neutrino physics geophysics studies, arXiv: 0810.4975 [hep-ex].
10. И.Р. Барабанов, Г.Я. Новикова, В.В. Синев, Е.А. Янович, Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане, Препринт ИЯИ РАН 1228/2009;
11. Воеводский А.В., Дадыкин В.Л., Ряжская О.Г. // ПТЭ, 1970, N1. С.85-87.
12. И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, Н.А.Данилов, С.В.Куцев, В.П.Моргалюк, Г.Я.Новикова, В.В.Синев, Е.А.Янович Физико-химическое исследование линейного алкилбензола как базового компонента для создания сцинтилляционных нейтринных детекторов, ЖПХ, 2011, Т.84, вып.3, стр. 385-391.
13. Николотова З.И., Карташова Н.А. Экстракция нейтральными органическими соединениями. Справочник по экстракции в 3 т. Т.1, под ред. А. М. Розена. М. : Атомиздат, 1976. 600 с.

14. В. П. Моргалюк, Н. Н. Попова, И. Артюшин, Е. В. Шарова, И. Г. Тананаев, Э. Е. Нифантьева Алкил (*N,N*-дибутилкарбамоилметил)метилфосфинаты — новые реагенты для экстракционного и сорбционного извлечения f\_элементов и технеция(VII) из кислых растворов. Известия Академии наук, сер. Химическая, 2014, N11. С.2541-2545.
15. Данилов Н.А., Барабанов И.Р., Безруков Л.В., Новикова Г.Я., Янович Е.А. и др. О возможности глубокой очистки неодима от следов тория и урана жидкостной экстракцией. Радиохимия. 2011. Т.53, N3. С. 229-236.
16. Безруков Л.Б., Бакулина Н.И., Иконников Н.С., Моргалюк В.П., Новикова Г.Я., Чепурнов А.С., Исследование прозрачности отечественного ЛАБа как растворителя для сцинтилляторов большого объема, препринт ИЯИ РАН 1382/2014, апрель 2014.
17. Свердлова О.В. Электронные спектры в органической химии. М.: Химия, 1973. 248 с.