

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА БАЗЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Ю. Н. Харжеев *

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Сцинтилляционные детекторы (СД) на базе пластических органических сцинтилляторов и оптических волокон являются одними из базовых детекторов на всех современных ускорителях, а также в астрофизических и нейтринных экспериментах. В последние годы интерес к СД сильно возрастает в связи с предстоящей большой модернизацией ЛHC, строительством новых ускорителей — NICA, FAIR, FCC и др. Вместе с тем растут и требования к стабильности и надежности работы СД в новых условиях. Удовлетворение этих требований в значительной степени зависит от радиационной стойкости сцинтилляторов, оптических волокон и фотодетекторов.

Приводятся результаты исследований радиационной стойкости разных сцинтилляторов и оптических волокон (сцинтиллирующих, спектросмещающих и чистых), а также оптических клеев, используемых для улучшения светосбора волокнами.

Рассмотрены влияние различных факторов (дозы, мощности дозы облучения и вида облучений, материалов сцинтиллятора и люминесцирующих добавок) на световыход, светосбор и светопередачу облученных материалов и их восстановление во времени. Старение сцинтилляторов происходит независимо от радиации под влиянием окружающей среды (температуры, влажности). Этой проблеме также уделено некоторое внимание.

Scintillation detectors (SDs) based on organic plastic scintillators and optical fibers are among the basic detectors at all modern accelerators and in astrophysics and neutrino experiments. In recent years, interest in SDs has increased significantly due to the forthcoming large-scale updates of the LHC, the construction of new accelerators NICA, FAIR, FCC, etc. At the same time, requirements for the stability and reliability of SD operation in the new conditions became stricter and their fulfilment largely depends on the radiation hardness of the scintillators, optical fibers and photodetectors.

The review presents the results of the radiation hardness investigations of various scintillators and optical fibers (scintillating, wave length shifting and clear), and optical glues used to increase the light collection from the scintillators by the fibers.

*E-mail: kharzheev@mail.ru

The influence of various factors (dose, radiation dose rate, scintillator materials, fluors) on light output, light collection and light transmission of the irradiated materials and their recovery is considered. Aging of scintillators can be caused not only by radiation but also by environment effect (temperature, humidity). In the review, this problem also received some attention.

PACS: 29.20.Ka

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционные детекторы (СД), основанные на органических пластических сцинтилляторах и оптических волокнах, эффективно и надежно используются во многих экспериментах физики высоких энергий (ФВЭ) в течение многих десятилетий [1, 2]. Они являются одними из базовых детекторов на всех современных ускорителях, а также в астрофизических и нейтринных экспериментах благодаря многим своим достоинствам — стабильным во времени оптическим и пространственно-временным характеристикам, высокой эффективности регистрации заряженных частиц, простоте в изготовлении и эксплуатации, дешевизне [3]. В последние годы интерес к СД сильно возрастает в связи с предстоящей большой модернизацией LHC [4], строительством новых ускорителей — FCC [5], FAIR [6], NICA [7] и др.

В качестве сцинтилляторов в СД в основном используются полистирол (PS) и поливинилтолуол (PVT). Однако эти сцинтилляторы сами по себе обладают низким световыходом, обусловленным самопоглощением собственного излучения, поэтому сцинтилляторы, используемые в экспериментах, обычно представляют собой трехкомпонентные вещества, состоящие из основы PS или PVT и небольшого количества растворенных в ней различных люминесцирующих добавок (ЛД) — активаторов (первичных добавок) и спектросмещающих веществ (вторичных добавок).

Сбор света со сцинтилляторов и передача его на фотодетектор (ФД) производится спектросмещающими волокнами (WLS), уложенными в специальных канавках, прорезанных на поверхности небольших пластин (тайлов), или в сквозных отверстиях в длинных и узких брусках (стрипах). Для улучшения оптического контакта между сцинтиллятором и волокном и для повышения светосбора волокна часто клеиваются в этих канавках или отверстиях, а для повышения эффективности передачи света с WLS-волокон на удаленный от сцинтиллятора ФД часто используют оптически чистые волокна (CF).

Сцинтиллирующие волокна (SciFi) широко применяются в экспериментах ФВЭ для измерения светимости пучков, определения координат частиц, разделения частиц во времени пролета, триггирования и др. При этом они располагаются, как правило, в наиболее радиационно-загрязненных местах.

СД, востребованные в настоящих экспериментах и необходимые для будущих, состоят из очень большого количества небольших тайлов (в калори-

метра) и узких длинных стрипов (в нейтринных и других детекторах). ФД, которые используются и будут использоваться на этих СД, должны удовлетворять целому ряду повышенных требований по квантовой эффективности, однородности светосбора, пикселизации, компактности, энергоемкости (стоимости), размерам, чувствительности к магнитному полю. Всем этим требованиям в значительной степени удовлетворяют кремниевые фотодетекторы (SiPM), поэтому они вытесняют традиционные фотоумножители. Однако при выборе SiPM необходимо учитывать их недостатки: высокую чувствительность к изменениям температуры (темновые токи) и слабую радиационную стойкость по сравнению с фотоумножителями*.

Сцинтилляторы, оптические волокна, а также ФД на современных ускорителях подвергаются высоким радиационным нагрузкам, что приводит к ухудшению (разрушению) световыхода и светопередачи как основы сцинтиллятора, так и ЛД, ухудшаются светосбор и передающая способность света WLS-волоконными, изменяются также механические свойства волокон, происходят повреждения в структуре ФД. Поэтому планируемые к использованию сцинтилляторы и оптические волокна проходят испытания на радиационную стойкость.

В рамках модернизации спектрометров ATLAS [9], CMS [10], LHCb [11] и др. разворачиваются исследования как известных, так и новых материалов сцинтилляторов и оптических волокон, способных удовлетворять возрастающим требованиям радиационной стойкости.

В настоящем обзоре рассматриваются исследования по радиационной стойкости различных сцинтилляторов и оптических волокон, масштабы возникающих в них разрушений в зависимости от поглощенной дозы и мощности облучения, типа облучающих частиц, материалов сцинтилляторов и ЛД, а также восстановление облученных образцов.

Часто употребляемые в статье сокращения

PS (C_8H_8)_n, PVT (C_9H_{10})_n — соответственно полистирол, поливинилтолуол — основные материалы, используемые в качестве основы сцинтилляторов;

PMMA ($C_5O_2H_8$)_n — полиметилметакрилат, часто используемый в качестве внутренней оболочки многооболочечных волокон;

ЛД — люминесцирующие добавки (активаторы):

РРО ($C_{15}H_{11}NO$) — 2,5-дифенилоксазол,

рТР ($C_{18}H_{14}$) — паратерфенил,

РОРОР ($C_{24}H_{16}N_2O$) — 1,4-бис-2-(5-фенилоксазолил)бензол;

ЗНФ-(3-гидроксифлаван), Y11, Y(8), K27 — спектросмещающие добавки;

*В этом обзоре ФД не будут рассматриваться.

WLS, SciFi, CF-волокна — соответственно спектросмещающее, сцинтилирующее и чистое волокна;

S- и non-S типа WLS-волокна — соответственно волокна с ориентированными и однородно распределенными молекулами;

ФД — фотодетекторы.

1. РАДИАЦИОННЫЕ НАГРУЗКИ НА СОВРЕМЕННЫХ И ПЛАНИРУЕМЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

На современных ускорителях многие детекторы располагаются в местах, где радиационные нагрузки могут достигать очень больших значений. К числу таких детекторов, изготовленных на базе органических сцинтилляторов и оптических волокон, относятся электромагнитные и адронные калориметры, детекторы для измерения светимости пучков, трековые и времяпролетные детекторы.

Радиационная картина на одной четвертой части спектрометра ATLAS LHC со светимостью порядка $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ приведена на рис. 1 [8]. Радиационная нагрузка за 10 лет работы LHC на адронном калориметре HE-спектрометра CMS может составить 10 Мрад [9], а на волоконный трековый детектор спектрометра LHCb вблизи пучковой трубы — 3,5 Мрад [10].

На планируемых ускорителях светимость может существенно возрасти, например на High Luminosity LHC (HL-LHC) — до $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (к 2025 г.), на NICA [7] может составить $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ионов Au^{79+} и др. (см. табл. 1). Наряду с заряженными частицами в адронных и электромагнитных ливнях в калориметрах и других местах ускорителей образуются в большом количестве нейтроны, которые могут вносить значительные радиационные разрушения. Например, на LHC поток нейтронов может достигать более чем 10^{15} см^{-2} за 1 год [4], большие потоки нейтронов можно ожи-

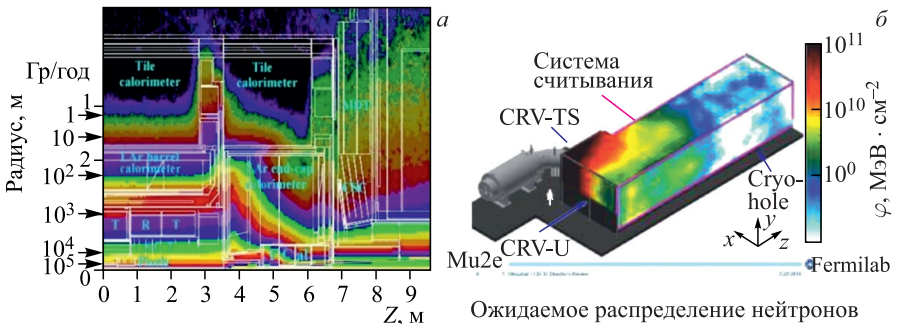


Рис. 1. Радиационная картина на спектрометре ATLAS LHC [4] (а) и CRV-модуле Mu2e [11] (б)

Таблица 1. Светимость на современных и планируемых ускорителях

Ускоритель	Светимость, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Частицы	Энергия	Ссылка
LHC, HL-LHC	$2 \cdot 10^{34}$ (в настоящее время) $\sim 5 \cdot 10^{34}$ (к 2025 г.)	$p + p$	14 ТэВ 14 ТэВ	[4]
FCC	$5 \cdot 10^{34}$ (2035 г.)	$p + p$	100 ТэВ	[5]
FAIR (HESR)	10^{32} (2025 г.)	\bar{p} + ионы	1–16 ГэВ	[6]
NICA	10^{27} (2020 г.)	Ионы Au ⁷⁹⁺	4–11 ГэВ	[7]

дать также в местах, удаленных от пучковой трубы, например на модуле CRV-TS (части вето-системы для космических мюонов) спектрометра Mu2e (рис. 1, б) — 10^{11} см^{-2} за его рабочий период [11].

2. ОБРАЗОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СВЕТА, РАЗРУШЕНИЕ ЕГО ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО ОБРАЗЦА

Ионизирующая частица, проходящая через сцинтилляторы, теряет свою энергию на ионизацию и возбуждение их молекул, которое передается π -электронам и переводит их в более высокие энергетические состояния. Переход из возбужденного состояния в основное происходит через синглетное S_1 или (редко) через триплетное T_1 состояние. Переход в первом случае сопровождается испусканием быстрых фотонов (10^{-9} – 10^{-8} с) сцинтилляционного света (флуоресценция), а во втором — медленных фотонов (10^{-4} с) (фосфоресценция).

Однако наиболее часто используемые PS- и PVT-сцинтилляторы обладают большим самопоглощением собственного излучения, поэтому на практике обычно используют трехкомпонентные сцинтилляторы. В основе сцинтиллятора растворяют в небольшом количестве ЛД — активаторы (1–2 % PPO, pTP, PBD) и спектросмещающие добавки (0,01–0,04 % PPOP). Энергия возбужденных молекул основы благодаря диполь-дипольному взаимодействию безрадиационно передается молекулам активатора (механизм Форстера [12]). Возбужденные молекулы активатора возвращаются в основное состояние, испустив фотоны в области длин волн около 370 нм, что находится в области поглощения спектросмещающих добавок. Схема рождения сцинтилляционного света в однокомпонентном и трехкомпонентном сцинтилляторах представлена на рис. 2, а и б соответственно [13].

Спектросмещающие добавки поглощают эти фотоны и переизлучают их с длинами волн, близкими к спектральной чувствительности наиболее часто используемых ФД. Подбор этих добавок осуществляется с учетом сдвигов

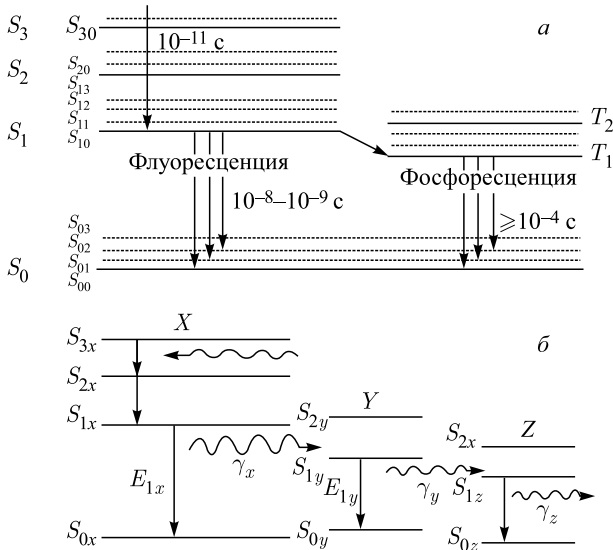


Рис. 2. Схема рождения сцинтилляционного света в однокомпонентном (а) и трехкомпонентном (б) сцинтилляторах [13]

Таблица 2. Характеристики некоторых популярных ЛД [14]

ЛД	Пиковая длина поглощения, нм	Пиковая длина эмиссии, нм	Разность между пиковыми длинами поглощения и эмиссии, нм
PBD	305	365	60
b-PBD	310	365	55
BDB	360	405/425	45/65
Y7	437/460	490	63/30
3HF	350	530	180
m3HF	350	430	80
Y11	430	476	46
POPOP	361	415	54
PPO	310	365	55
K27	355	492	37
pTP	290	360	70
Нафталин	310	325/340	15/30
X25	400	500	100
X31	400	500	100

в спектрах излучения и поглощения соответствующих компонентов (сдвиг Стокса). В табл. 2 приведены положения максимумов спектров поглощения и излучения, а также их разность для некоторых популярных ЛД.

Сцинтилляционный свет от основы сцинтиллятора собирается, переизлучается и передается на ФД с помощью спектросмещающих волокон, которые практически вытеснили ранее использовавшиеся громоздкие акриловые световоды.

PS (C_8H_8)_n и PVT (C_9H_{10})_n представляют собой ароматические углеводородные полимеры, состоящие из бензольных колец, связанных с метиловой (CH_3 -) и виниловой (CH_2 -CH-) группами соответственно (рис. 3, а, б). Иногда сцинтилляторы изготавливают на базе полиметилметакрилата РММА ($C_5O_2H_8$)_n, но РММА чаще всего используются в качестве внутренней оболочки оптических волокон (рис. 3, в).

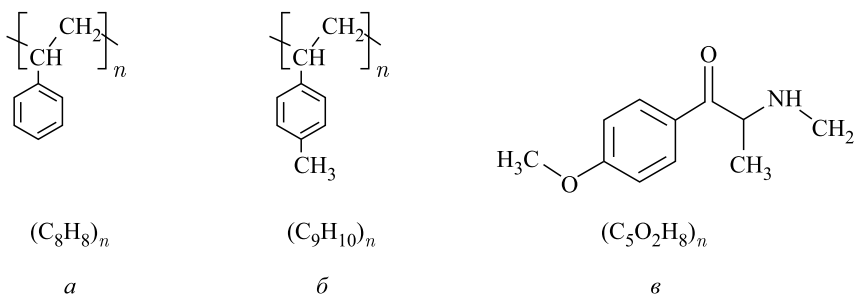


Рис. 3. Структура PS (а), PVT (б) и РММА (в) сцинтилляторов

Под действием радиации происходят разрушения молекулярных цепочек, разрывы цепочек, сшивание между соседними цепочками как в материалах основы сцинтиллятора, так и в WLS-волокнах. Это приводит к изменениям в структуре полимеров, образуются свободные радикалы (световые центры), на которых происходят поглощение и рассеяние сцинтилляционного света, а также выделяются разные газообразные продукты (табл. 3) [15]. В результате этих процессов ухудшаются световыходы и пропускающая способность (светопередача) сцинтилляторов, а также их механические свойства.

Потери сцинтилляционного света сильнее всего проявляются в области ультрафиолетовых и синих длин волн и менее всего — в области длинных волн, поэтому спектросмещающие добавки обычно выбирают с большим сдвигом Стокса в область длинных волн, такие как ЗНФ, Y11, РОРОР и др.

Радикалы также играют существенную роль в процессах восстановления световыхода и светопередачи сцинтилляторов, а их количество зависит от материала сцинтиллятора, поглощенной дозы, мощности дозы облучения. Радикалы представляют собой в основном нестабильные образования, которые могут распадаться или взаимодействовать друг с другом. При больших мощностях дозы скорость образования радикалов высокая, а общее время облучения короткое. Окислительные процессы перестают поддерживаться из-за

недостатка O_2 , а при малых мощностях дозы облучения картина противоположная. Восстановление облученных материалов сильно зависит от поглощенной дозы, мощности дозы облучения, окружающей среды, при этом особую роль играет O_2 [18, 19]. Оно происходит, как правило, не полностью, а до некоего остаточного постоянного уровня.

В табл. 3 приведены газообразные продукты, образующиеся при облучении электронами и γ -квантами некоторых полимеров [15], а в табл. 4 — значения G , характеризующие количество радиационных повреждений в PS и PMMA, приходящихся на 100 эВ поглощенной энергии в 1 моле вещества: образование радикалов и газов, деградацию молекул и сшивание между соседними цепочками [16]. Процессы сшивания доминируют в PS, тогда как процессы образования радикалов и деградации — в PMMA.

Таблица 3. Образование газообразных продуктов из полимеров, облученных γ -квантами и электронами при комнатной температуре [15]

Полимер	Газообразные продукты G , количество молекул на 100 эВ
Полиэтилен	$H_2 \sim 3$; $CH_4 \sim 0,002$
Полипропилен	$H_2 \sim 2,5$; $CH_4 \sim 0,1$
Полиизобутилен	$H_2 \sim 1,5$; $CH_4 \sim 0,5$
Поливинилхлорид	$HCl \sim 2,7$; $H_2 \sim 1,5$; $CH_4 \sim 0,002$
Поливинилацетат	$H_2 \sim 0,6$; $CH_4 \sim 0,3$; $CO \sim 0,28$; $CO_2 \sim 0,06$
Полиметилметакрилат	$H_2 \sim 0,2$; $CH_4 \sim 0,6$; $CO \sim 0,5$; $CO_2 \sim 0,4$
Полистирол	$H_2 \sim 0,03$; $CH_4 \sim 1 \cdot 10^{-5}$
Поли-альфа-метилстирол	$H_2 \sim 0,04$; $CH_4 \sim 0,003$

Таблица 4. Значения G , характеризующие количество радиационных повреждений в PMMA и PS, приходящихся на 100 эВ поглощенной энергии в 1 моле вещества

Процесс	G	
	PMMA	PS
Образование радикалов	2,4–2,5	0,200
Газообразование	1,18 (30,5 % CO , 15,7 % CO_2 , 14,2 $HCOOCH_3$, 13,1 % CH_4 , 11,7 H_2 , ...)	0,026
Деградация	1,7–2,6	0,009
Сшивание	0	0,034

3. РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ НА РАДИАЦИОННЫХ ИСТОЧНИКАХ, УСКОРИТЕЛЯХ И НЕЙТРОННЫХ РЕАКТОРАХ

3.1. Сцинтилляторы. *3.1.1. Люминесцирующие добавки.* В адронных калориметрах используются сцинтилляторы в виде пластин (тайлов) с канавками на их поверхности для укладки WLS-волокон, которые собирают сцинтилляционный свет, преобразуют его длину и передают на ФД. В электромагнитных калориметрах типа «шашлык» WLS-волокна прокладываются через специальные отверстия, сделанные через стопку из чередующихся между собой сцинтилляционных и свинцовых пластин. В нейтринных экспериментах в основном используются длинные узкие сцинтилляционные бруски (стрипы) с канавками на их поверхности или сквозными отверстиями для укладки в них WLS-волокон. Сцинтилляционные пластины самых разных размеров используются во времяпролетных, триггерных устройствах, в вето-системах, а в последних — также стрипы.

Радиационная стойкость сцинтилляторов зависит не только от их основы, но и от ЛД. Комплексные исследования радиационной стойкости PS- и PVT-сцинтилляторов с разными ЛД и концентрациями были проведены на γ -квантах от ^{60}Co при дозах 2,3, 3,3, 10 и 14,3 Мрад [14].

Сцинтилляторы с первичными добавками pTP, PPO, PBD, b-PBD показали близкие и хорошие характеристики по радиационной стойкости, а сцинтилляторы, содержащие пиразолин и бензоксазол, а также BPO, PO, PBD и ультрафиолетовые сцинтилляторы, проявили себя менее радиационно стойкими. Повышенную радиационную стойкость показали PS-сцинтилляторы с вторичными ЛД, содержащими большие концентрации производных от нафталина (X25, X31), а также с 3HF и m3HF (табл. 2 и 5).

Таблица 5. Сводные данные с некоторых сцинтилляторов по световыходу до (L_0) и после (L) облучения, их отношения L/L_0 при разных дозах и временах после облучения, взятые из табл. 1, 3 и 4 [14]

Сцинтиллятор	L_0 , %	L/L_0 , % (доза, Мрад)	L/L_0 , % (доза, Мрад)	L/L_0 , % (время)
PVT + 2 % PBD + 0,01 % РОРОР	100	72 (3,3)	37 (14,3)	48 (3 мес.)
PS + 2 % pTP + 0,025 % РОРОР	98	71 (2,3)	23 (10)	52 (23 сут)
PS + 10 % PPO + 0,5 % РОРОР	98	73 (2,3)	36 (10)	67 (23 сут)
PS + 5 % N + 2 % pTP + + 10 % PPO + 0,5 % РОРОР	71	93 (2,3)	59 (10)	69 (23 сут)
PS + 2,0 % pTP + 0,025 % X25	78	72 (4)	53 (10)	58 (23 сут)

Исследования радиационной стойкости пластиковых PS-сцинтилляторов были проведены на ^{60}Co при дозе 2,8 Мрад и мощности дозы 850 рад/мин при разных концентрациях ЛД, усилителях диффузии и стабилизаторах [17].

Показано, что радиационная стойкость и световыход сцинтилляторов с ЛД выше, чем у сцинтилляторов, изготовленных из мономера, причем они слегка растут с повышением концентрации первичных ЛД. Оптимальной концентрацией для рТР является 6%. С увеличением концентрации наиболее популярной вторичной ЛД (РОРОР) световыход и передающая способность сцинтиллятора несколько падают, и оптимальной его концентрацией является 0,01–0,02%.

Применение усилителей диффузии и стабилизаторов дало значительный выигрыш в световыходе и радиационной стойкости. Сцинтиллятор, изготовленный с ЛД (2% рТР + 0,02% РОРОР), усилителем диффузии 20% и стабилизатором 0,01%, сохраняет 91% от световыхода после облучения спустя всего 1,5 ч.

Одной из наиболее радиационно стойких ЛД считается ЗНФ, спектр поглощения которого охватывает спектры эмиссии популярных сцинтилляторов и ЛД. Влияние радиации на световыход и передающую способность PS-сцинтилляторов с одним ЗНФ в качестве ЛД и для сравнения ВС-408, а также третичных сцинтилляторов, т. е. сцинтилляторов с двумя ЛД (1% рТР + 0,1% ЗНФ и 1% рТР + 0,01% ЗНФ), исследовано в работе [18]. Облучения были проведены на γ -квантах от ^{60}Co дозами 10 и 30 Мрад в зави-

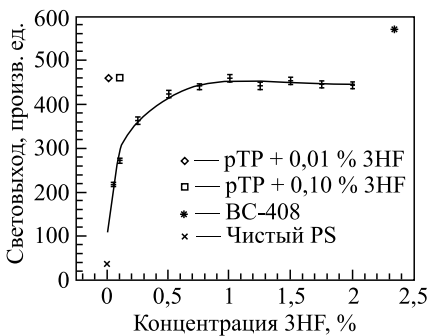


Рис. 4. Световыход необлученного ЗНФ-сцинтиллятора в зависимости от концентрации ЗНФ [18]. Приведены световыходы ВС-408, чистого PS и третичных сцинтилляторов (PS + 1% рТР + 0,1% ЗНФ) и (PS + 1% рТР + 0,01% ЗНФ)

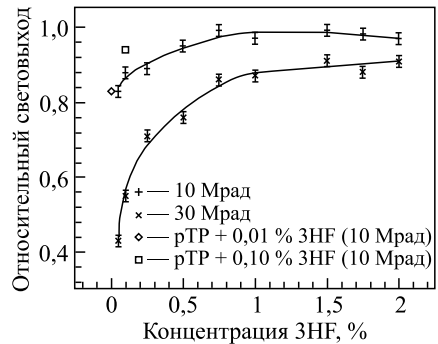


Рис. 5. Отношение световыхода ЗНФ-сцинтиллятора, измеренного после восстановления, к световыходу, измеренному до облучения, в зависимости от концентрации ЗНФ при облучении дозами 10 и 30 Мрад; то же самое для третичных сцинтилляторов, облученных дозой 10 Мрад [18]

симости от весовой концентрации (ε) ЗНФ в интервале от 0,05 до 2,0%. Световыходы необлученного и облученного ЗНФ-сцинтиллятора (сразу после облучения) в зависимости от ε представлены на рис. 4 и 5 соответственно. Кроме того, на рис. 4 приведены световыходы чистого PS, а также BC-408 и третичных сцинтилляторов с добавками рТР + 0,01 % ЗНФ и рТР + 0,1 % ЗНФ.

Наблюдается возрастание потерь в световыходе ЗНФ-сцинтилляторов с уменьшением концентрации ЗНФ. При дозе облучения 10 Мрад потери в световыходе восстановленного сцинтиллятора при $\varepsilon = 1\%$ составили 3%, а при $\varepsilon = 0,10\%$ и 0,05% соответственно 12 и 17% (см. рис. 5). Такие же потери

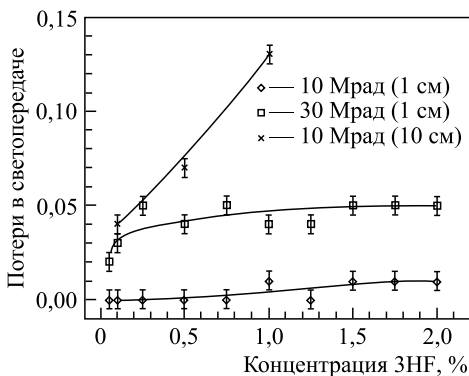


Рис. 6. Измеренные после восстановления потери в светопередаче при $\lambda = 530$ нм ЗНФ-сцинтилляторов толщиной 1 см (две нижние кривые) и 10 см (верхняя кривая), облученных дозами 10, 30 Мрад, в зависимости от концентрации ЗНФ [18]

рТР + 0,01 % ЗНФ. Сравнение световыходов этого сцинтиллятора с третичным сцинтиллятором, в котором вторичная добавка ЗНФ не подвергалась облучению 100 Мрад, не показало заметной разницы. Таким образом, основной причиной потерь в световыходе сцинтиллятора являются разрушения в его основе.

Высокую радиационную стойкость показали PVT-сцинтилляторы с ЛД рТР и ЗНФ, облученные γ -квантами от ^{60}Co дозой 10 Мрад при мощности дозы 0,08 Мрад/ч. Их ускоренное восстановление было проведено в атмосфере аргона и при температуре 50 °С [19]. Исследования показали, что рТР и ЗНФ являются радиационно стойкими (включая восстановление) при дозах до 10 Мрад и потери в сцинтиляторе обусловлены лишь потерями в передающей способности самого PVT-сцинтиллятора.

в световыходе 17% наблюдаются в третичном сцинтиляторе при дозе облучения 10 Мрад и $\varepsilon = 0,01\%$, а при $\varepsilon = 0,10\%$ — 6%.

Отметим, что максимальный световыход ЗНФ-сцинтиллятора наблюдается при концентрации ЗНФ около 1%, так же как у типичных третичных сцинтилляторов. Потери в светопередаче ЗНФ-сцинтиллятора толщиной 10 см после восстановления остаются сравнительно небольшими (~12%), даже при концентрации ЗНФ 1% (рис. 6).

Для изучения влияния радиации на эмиссионную способность ЗНФ-образца его облучали дозами до 100 Мрад, а затем использовали в качестве вторичной ЛД в третичном сцинтиляторе PS + 1%

3.1.2. *Материалы основы сцинтилляторов (PMMA, PS, PVT).* Исследования радиационных разрушений, вызванных γ -квантами дозой 10^3 – 10^5 Гр при мощности дозы 30–1000 Гр/ч в тонких образцах полистирола SCSN-38, в изготовленных на базе PMMA спектросмещающих веществах (Y7 UVA, K27 UVA) и световодах (GS218, GS233 UVA, XT20070 UVA), а также в сцинтилляторе AFS (PMMA + 10 % нафталина + 1 % бутил ПВД) описаны в работе [16]. Ультрафиолетовые абсорберы UVA были использованы для подавления черенковского света. Световод XT20070 был экструдирован из PMMA. Показано, что SCSN-38 после прекращения облучения быстро просветляется в атмосфере O_2 и очень медленно — в инертных газах (N_2 , CO_2 , Ar). Исключение составил сцинтиллятор AFS, просветление которого наблюдалось только в инертных газах.

Толщина зоны просветления (z) для SCSN-38, Y7, K27 и GS218, GS233 UVA, XT20070 UVA в зависимости от времени хорошо описывается формулой $z^2 = \alpha t$. Зависимость z^2 от времени для SCSN-38 и K27 WLS после кратковременного облучения их дозой 24 кГр представлена на рис. 7, а и б соответственно. Просветление SCSN-38 в воздухе происходит намного быстрее, чем K27 WLS (линия на рис. 7, а и линия 2 на рис. 7, б), просветление последнего в O_2 также происходит быстрее, чем в сухом воздухе (линии 1 и 2 на рис. 7, б).

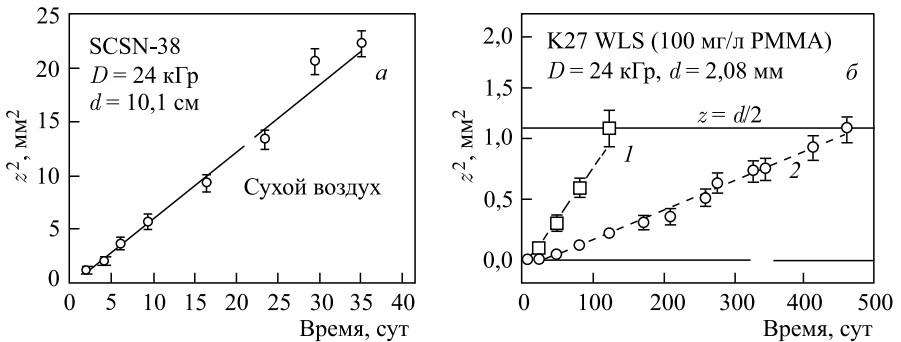


Рис. 7. Просветление сцинтилляторов SCSN-38 (а) и K27 WLS (б) после кратковременного облучения дозой 24 кГр. WLS (1) облучался в Ar и выдерживался в O_2 ($P = 800$ мб), а WLS (2) и SCSN-38 облучались и выдерживались в сухом воздухе (160 мб O_2 + 640 мб N_2) [16]

Скорость просветления (восстановления) зависит от окружающей среды, материала сцинтиллятора, количества образовавшихся радикалов в процессе облучения. Восстановление полистирола SCSN-38 в сухом воздухе происходит за 40 ч, в инертной среде — почти за полгода, в O_2 происходит быстрее, чем в сухом воздухе (кривые 4, 5 и б), а в инертной атмосфере (N_2 , Ar,

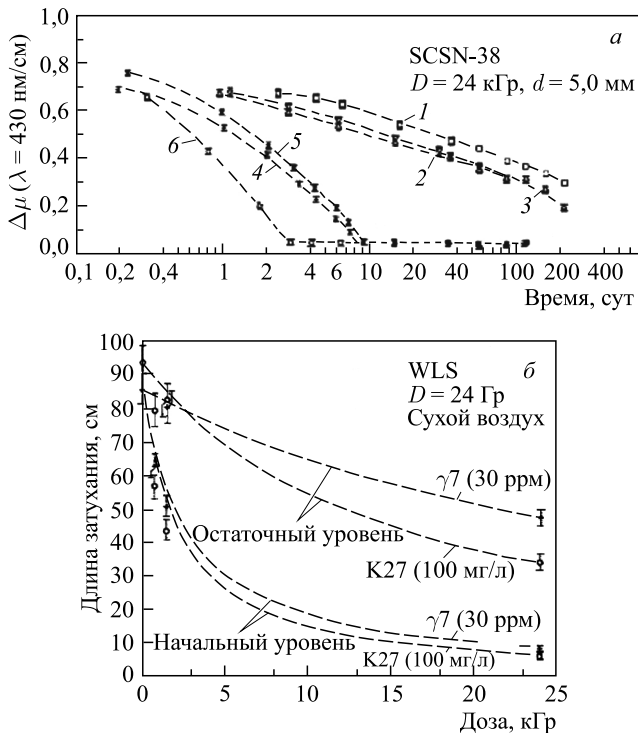


Рис. 8. а) Восстановление SCSN-38 в разных газах. Зависимость дополнительного коэффициента поглощения $\Delta\mu$ от времени. Экспериментальные условия: облучение и хранение SCSN-38 проведено в N₂ (1), Ar (2) и в сухом воздухе (4). Образцы 3, 5, б облучались в Ar и хранились в CO₂ (3), сухом воздухе (5) и O₂ (6). б) Зависимость длины затухания сцинтилляторов с основой PMMA и добавками Y7 и K27 при разных их концентрациях от дозы облучения [16]

CO₂) (кривые 1, 2, 3) гораздо медленнее, чем в O₂ и сухом воздухе (рис. 8, а). Остаточный, невосстанавливаемый уровень разрушений составляет 5–10% от уровня, наблюдаемого сразу после облучения.

Восстановление K27 WLS на базе PMMA в атмосфере O₂ происходит за время более чем 1 год. Это объясняется тем, что концентрация радикалов в PMMA в 60 раз выше, чем в PS, и, кроме того, коэффициент диффузии O₂ в PMMA в 10 раз ниже, чем в PS [20].

Сцинтилляторы с основой PMMA и добавками K27 и Y7, облученные γ -квантами от ⁶⁰Co дозой 24 кГр, показали сразу после облучения большие радиационные повреждения, что проявляется в поведении их длин затухания и в процессе восстановления (рис. 8, б) [16]. Длины затухания сцинтилляторов с этими добавками уменьшились с 90 см (до облучения) до 9 см (после

облучения), а после 583 сут восстановления на воздухе они составили 37 см для K27 и 48 см для Y7. Это свидетельствует о том, что Y7 более радиационно стоек, чем K27.

В рамках модернизации детектора Tile-калориметра спектрометра ATLAS были проведены исследования радиационной стойкости сцинтилляторов разных производителей [21] — ИФВЭ (Protvino) [22], ISMA (Kharkov) [23], Bicron [24] и ELJEN [25]. Сцинтилляторы Protvino и ISMA Kharkov (в табл. 6 отмечен как Dubna) были изготовлены из PS, а сцинтилляторы двух других производителей — из PVT. В процессе модернизации планируется заменить сцинтилляторы в детекторе MBTS, используемом в области зазора между центральным и расширенным баррелями Tile-калориметра, на более радиационно стойкие.

Представляет большой интерес изучение характеристик сцинтилляторов EJ-200, EJ-208, EJ-260 (ELJEN), которые ранее не использовались в спектрометре ATLAS, и сравнение их с соответствующими характеристиками сцинтилляторов других производителей. Сцинтилляторы Protvino и Dubna использовались в Tile-калориметре и MBTS-детекторе соответственно. Все сцинтилляторы излучают в синей области спектра, кроме сцинтиллятора EJ-260, излучающего в зеленой области.

Образцы сцинтилляторов в виде небольших пластин $5 \times 5 \times 0,35$ мм облучались протонами с энергией 6 МэВ при очень больших дозах (0,8, 8, 25 и 80 МГр). Сводные данные по потерям светопередачи для всех исследованных сцинтилляторов при разных дозах облучения и длине волны 420 нм приведены в табл. 6.

Таблица 6. Потери в светопередаче (T) сцинтилляторов при разных дозах облучения (при длине волны $\lambda = 420$ нм) [21]

Образец	Доза, МГр	Потеря T , %	Образец	Доза, МГр	Потеря T , %
EJ-200	80	12,9	Protvino	80	60,8
	25	28,6		25	34,8
	8	14		8	7,4
	0,8	3,9		0,8	3,3
EJ-208	80	29,1	Dubna	80	51,3
	25	14,9		25	35,1
	8	4,7		8	26,6
	0,8	2,5		0,8	5,5
EJ-260	80	44,8	Bicron	80	45,5
	25	45,5		25	39,5
	8	14,3		8	11,5
	0,8	6,6		0,8	8,7

При больших дозах облучения (> 8 МГр) наибольшие потери в светопередаче испытывают сцинтилляторы PS, а также Viscon, а наименьшие — сцинтилляторы EJ (см. табл. 6). Результаты измерений светопередачи сцинтиллятора EJ-208 сразу после облучения в зависимости от длины волны при разных дозах облучения приведены на рис. 9, *а*. По мере увеличения дозы облучения наблюдается снижение светопередачи сцинтиллятора и смещение спектров в область более длинных волн. Аналогичная картина наблюдалась и у сцинтиллятора EJ-260.

Из всех сцинтилляторов EJ наилучшие результаты по светопередаче при всех дозах облучения показывает EJ-208, а по времени восстановления — EJ-260 (табл. 7). Восстановление передающей способности сцинтилляторов EJ-260 и EJ-208 происходит лучше, чем EJ-200, и, что очень важно с практи-

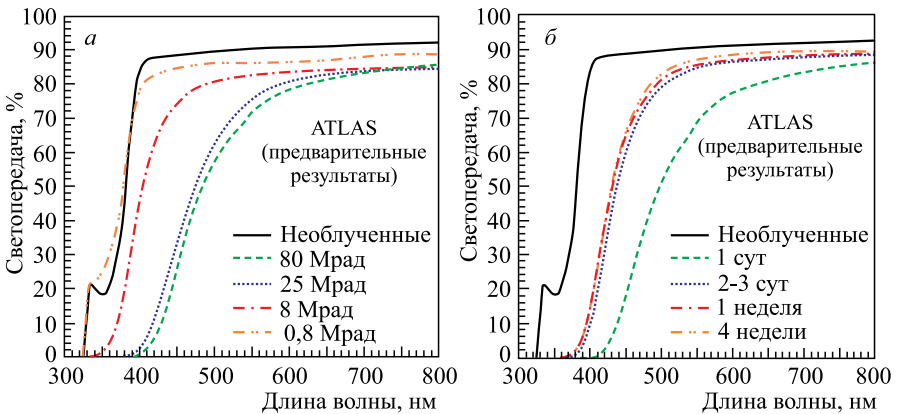


Рис. 9. Зависимость светопередачи сцинтилляторов EJ-208 от длины волны при разных дозах облучения (*а*) и временах после облучения (*б*) [21]

Таблица 7. Потери в светопередаче ΔT (%) сцинтилляторов EJ в зависимости от времени после облучения при дозах 8 и 25 МГр [21], определяемые как разность потерь в светопередаче (%) между необлученными и облученными образцами

Доза, МГр	Образец	ΔT , %
1 сут – 1 неделя		
25	EJ-200	30,38
	EJ-208	37,06
	EJ-260	6,45
1 сут – 4 недели		
8	EJ-200	15,05
	EJ-208	5,92
	EJ-260	2,22

ческой точки зрения, существенное восстановление их происходит за первые 2–3 сут, а за последующие 4 недели — очень незначительно (см. рис. 9, б и табл. 7).

В рамках модернизации адронного HE-калориметра CMS LHC на канале H2 SPS ЦЕРН на пучке μ -мезонов с энергией 150 ГэВ были проведены исследования световых выходов, эффективности светосбора и временных характеристик сцинтилляторов ELJEN [25]. Основная цель этих исследований — изучение возможности замены сцинтилляторов SCSN-81, использующихся в CMS HCAL. При выборе сцинтилляторов исходили из того, что сцинтилляторы с повышенной концентрацией ЛД и спектром излучения, продвинутом в зеленую область, обладают повышенной радиационной стойкостью [21]. Выбор был остановлен на сцинтилляторах EJ-200 P2 с разными первичными ЛД и EJ-200 2X с повышенным в 2 раза содержанием ЛД, спектр излучения которых продвинут в зеленую область (табл. 8 [26]).

Таблица 8. Основные характеристики сцинтилляторов, исследованных в [26]

Сцинтиллятор	Основа	Пиковая длина волны эмиссии, нм	Примечание
SCSN-81	PS	440	Используется на CMS HCAL, производство прекращено
EJ-200	PVT	425	Коммерческий сцинтиллятор ELJEN, эквивалент BC-408
EJ-200 2X	PVT	425	Специальная версия EJ-200, в которой первичные добавки в 2 раза выше, чем в коммерческой версии EJ-200
EJ-200 P2	PVT	425	Специальная версия EJ-200, в которой используются разные первичные добавки
EJ-260	PVT	490	Сцинтиллятор зеленого спектра, время высвечивания которого 9,2 нс (сине-го — 2 нс)

Результаты исследований сравнивались с характеристиками сцинтиллятора SCSN-81 и коммерчески доступного сцинтиллятора EJ-200. Исследуемые сцинтилляторы (тайлы) имели размеры $100 \times 100 \times 4$ мм. Светосбор с них проводился WLS-волокнами Kuraray Y11 или O-2, соединенными с SiPM. Волокна O-2 имеют эмиссионный пик 538 нм. Волокна укладывались в σ -образную канавку на поверхности тайла. Световых выходы EJ-200 2X и EJ-260 оказались меньшими, чем у SCSN-81, так как увеличение концентрации ЛД

в EJ-200 2X приводит к возрастанию самопоглощения света в самой ЛД. Меньший световыход EJ-260 частично объясняется его меньшей прозрачностью, чем у EJ-200, и меньшей квантовой эффективностью SiPM в зеленой области, чем в синей области излучения, характерной для EJ-200. Однако

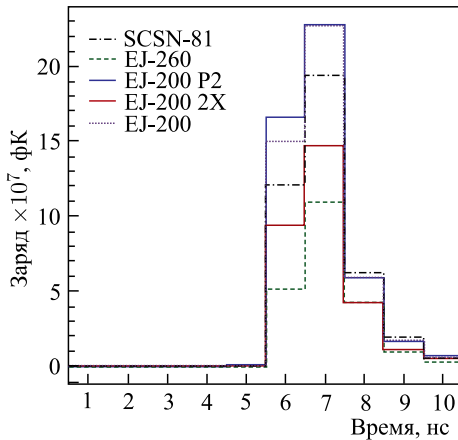


Рис. 10. Распределение проинтегрированного заряда от сцинтилляторов во временном интервале 25 нс (по полному набору данных)

временные характеристики EJ-200 P2 и SCSN-81 практически не отличаются. «Зеленые» EJ-260 оказываются медленнее, чем «синие» сцинтилляторы, примерно на 5 нс, что не выходит за пределы длительности 25 нс банча на LHC (рис. 10). Таким образом, анализ световыхода и временных характеристик исследованных сцинтилляторов показывает, что повышенные концентрации ЛД и переход к ЛД со спектрами излучения в зеленой области представляются перспективными.

На современных и планируемых ускорителях требуются сцинтилляторы, удовлетворяющие повышенным требованиям не только к радиационной стойкости, но и к временным характеристикам. Особый интерес представляет также стоимость сцинтилляторов, поскольку в экспериментах требуется огромное их количество. Например, в Tile-калориметре спектрометра ATLAS применяется около 500 тыс. сцинтилляторов (тайлов). В связи с этим представляют большой интерес исследования радиационной стойкости и временных характеристик таких доступных материалов, как полиэтиленнафталат (PEN), полиэтилентерефталат (PET), проведенные в [27]. Отметим, что эти материалы широко используются в производстве обычных пластиковых бутылок, разнообразных контейнеров и т.д. Исследованные образцы PET и PEN имели размеры $100 \times 100 \times 2$ мм и $100 \times 100 \times 1$ мм соответственно.

Эти материалы обладают хорошими сцинтиллирующими свойствами. Спектры испускания сцинтилляторов PEN и PET находятся в синей области с пиковыми длинами 450 и 350 нм и со световыходами 10500 и 2200 фотонов соответственно. Радиационные испытания сцинтилляторов PEN и PET проведены на γ -квантах от ^{137}Cs дозами 1,4 и 14 Мрад. Измеренные при этом потери в световыходе сцинтилляторов в зависимости от времени в течение 50 сут после облучения приведены на рис. 11.

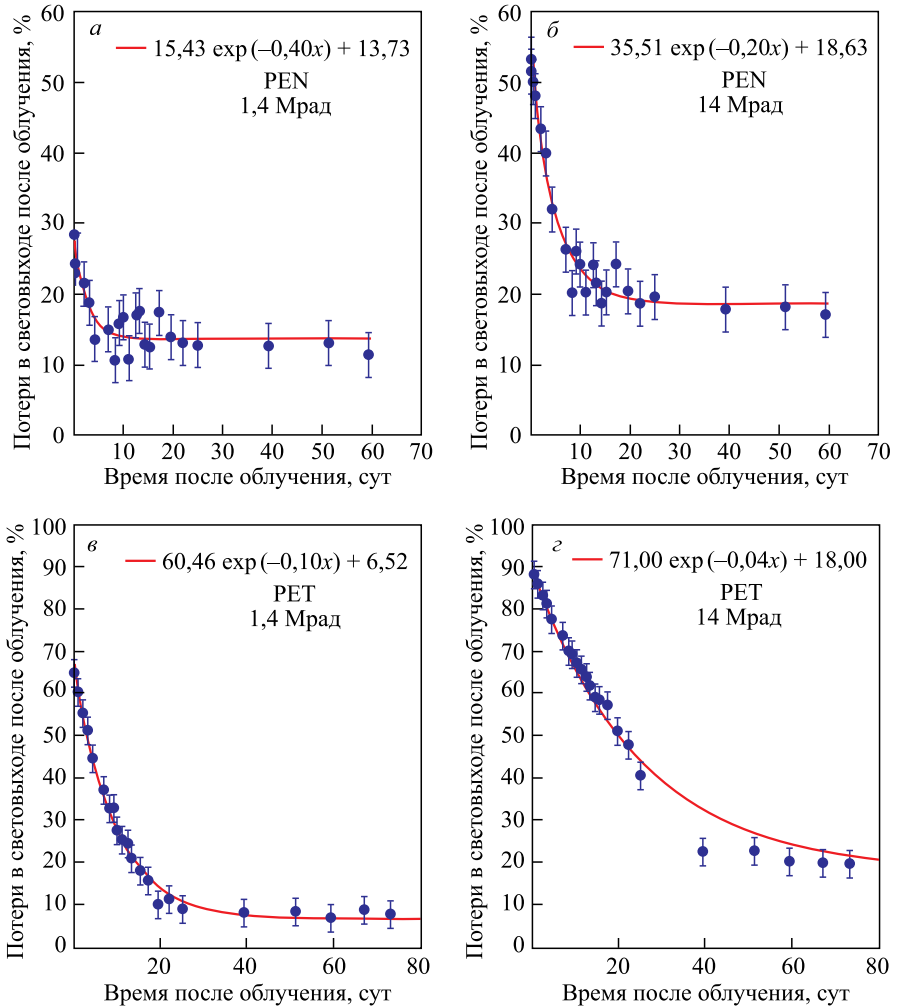


Рис. 11. Потери в световыходе PEN (а, б) и PET (в, г), облученных γ -квантами от ^{137}Cs дозами 1,4 и 14 Мрад соответственно в течение 50 сут после облучения

В табл. 9 приведены суммарные результаты световыходов сразу после облучения и восстановления, а также время восстановления обоих сцинтилляторов при дозах 1,4 и 14 Мрад. Потери в световыходе PEN сразу после облучения составили при дозе облучения 1,4 Мрад 28,6% и при 14 Мрад 53,3%, а PET — 65% (87,8%). Остаточные после восстановления световыходы обоих сцинтилляторов при дозе 14 Мрад практически одинаковы, а время восстановления сцинтиллятора PEN намного меньше, чем у PET.

Таблица 9. Световыходы (LY) и время восстановления сцинтилляторов PEN и PET, облученных дозами 1,4 и 14 Мрад

Образец	Первичный LY, %		Восстановленный LY, %		Время восстановления, сут	
	1,4 Мрад	14 Мрад	1,4 Мрад	14 Мрад	1,4 Мрад	14 Мрад
PEN	71,4	46,7	85,9	79,5	5,0	9,0
PET	35,0	12,2	93,5	80,0	22,0	60,0

Временные характеристики PEN- и PET-сцинтилляторов были изучены в сравнении с используемым в эксперименте CMS LHC сцинтиллятором SCSN-81. Времена отклика их оказались 27,12, 6,884 и 10,56 нс соответственно для сцинтилляторов PEN, PET и SCSN-81, т.е. PET имеет намного более быстрое время отклика, чем PEN.

Исследования сцинтилляторов PEN (полиэтиленнафталят (Scintirex Brand Scintillator) [28], ES (эпоксидный эластомер с рTP-добавками), EJ-260 (ENJ) и EJ-260 (EJ2P) с точки зрения их восстановления после облучения γ -квантами от ^{137}Cs дозами 100 кГр (PEN) и 78 кГр (ES, EJ) были проведены в [29]. PEN- и ES-сцинтилляторы характеризуются синим спектром излучения, а EJN и EJ2P — зеленым. Исследуемые образцы PEN имели размеры $5 \times 5 \times 0,1$ см, а три другие — несколько см^2 в сечении и толщину 1 см.

После облучения два образца PEN содержались в темных ящиках, а еще один помещался в светодиодную матрицу RGB LED, аналогично и все другие образцы. Спустя 7 сут после облучения два образца PEN, помещенные в черный ящик (ЧЯ), восстановились до 40%-го, а третий со светодиодной матрицей — до 72%-го уровня необлученных образцов. Соответствующие параметры восстановления для ES-сцинтилляторов оказались равными 56 и 46 %. Использование RGB LED не дало заметного эффекта при восстановлении образцов EJ2P и EJN (табл. 10).

Таблица 10. Параметры фитирования функцией $a \exp(-bt) + c$, где a — разность между S250-100 первичным и остаточным уровнями разрушений, c — константа восстановления, b — остаточный уровень разрушений

Образец	$a, \%$	$b, \%$	$c, \text{сут}^{-1}$
ES (RGB)	$56,3 \pm 2,4$	$30,7 \pm 1,6$	$0,22 \pm 0,03$
ES (ЧЯ)	$45,7 \pm 2,5$	$44,1 \pm 1,9$	$0,18 \pm 0,03$
EJN (RGB)	$24,0 \pm 2,2$	$6,92 \pm 0,7$	$0,64 \pm 0,16$
EJN (ЧЯ)	$21,1 \pm 1,8$	$15,9 \pm 0,6$	$0,50 \pm 0,11$
EJ2P (RGB)	$26,9 \pm 3,1$	$15,2 \pm 0,9$	$0,75 \pm 0,22$
EJ2P (ЧЯ)	$26,5 \pm 2,2$	$13,7 \pm 0,7$	$0,62 \pm 0,14$

В табл. 10 приведены сводные данные по восстановлению сцинтилляторов ES, EJN, EJ2P в зависимости от времени t , профитированные функцией

$$f(t) = a \exp(-bt) + c, \quad (1)$$

где a — разность между первичным (сразу после облучения) и остаточным уровнями разрушений, c — константа восстановления, b — остаточный уровень разрушений.

Таким образом, использование светодиодной матрицы RGB LED с синим спектром излучения оказалось весьма эффективным средством для улучшения восстановления «синих» сцинтилляторов PEN и ES, а для восстановления «зеленых» сцинтилляторов EJ2P и ENJ необходимо подобрать другие светодиоды.

Исследования процессов восстановления быстрых сцинтилляторов BC-408, BC-404 и EJ-200, используемых часто для временных измерений,

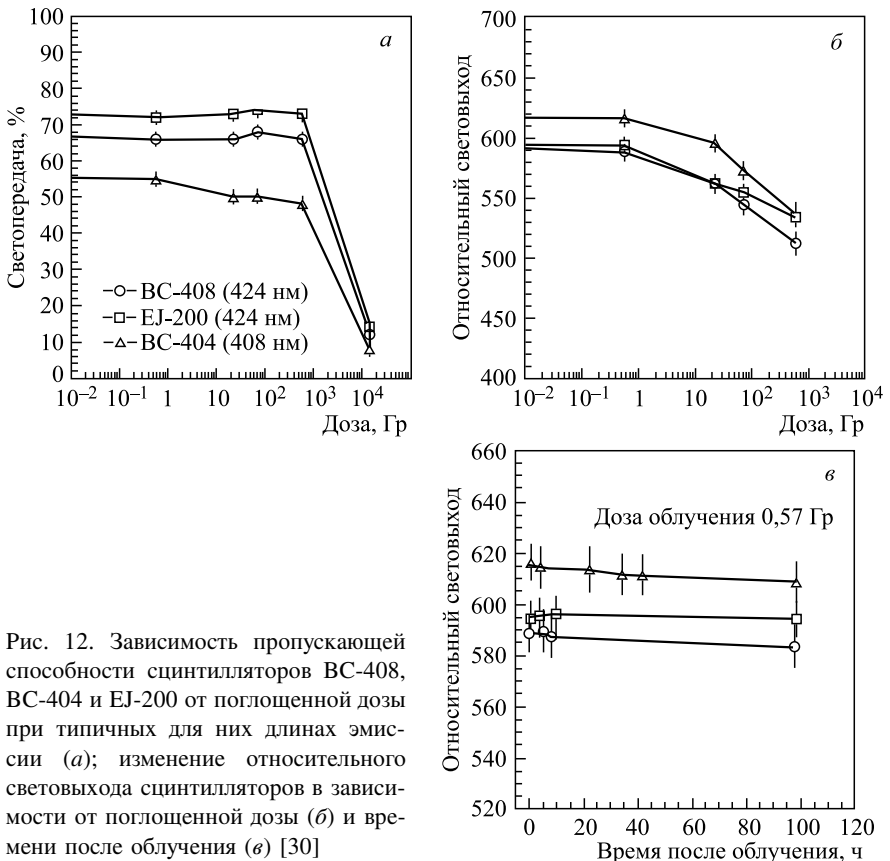


Рис. 12. Зависимость пропускающей способности сцинтилляторов BC-408, BC-404 и EJ-200 от поглощенной дозы при типичных для них длинах эмиссии (а); изменение относительного световыхода сцинтилляторов в зависимости от поглощенной дозы (б) и времени после облучения (в) [30]

были проведены на γ -квантах от ^{60}Co при дозах $0,57\text{--}1,4 \cdot 10^4$ Гр [30]. Пропускающая способность этих сцинтилляторов при облучении их дозой до 600 Гр почти не меняется, а существенное ее изменение наблюдается лишь

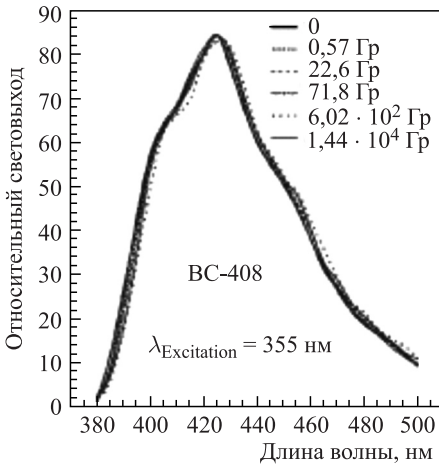


Рис. 13. Спектры эмиссии сцинтиллятора ВС-408 до и после облучения [30]

3.1.3. Зависимость радиационной стойкости от мощности дозы облучения. Разрушения, производимые радиацией в сцинтилляторах, зависят не только от поглощенной дозы, но и от ее мощности. Влияние мощности дозы облучения на световойход было исследовано на сцинтилляторах SCSN-38, SCSN-81 и BC-499-35, первые два из которых были изготовлены из PS, а третий — из PVT [31]. Световыходы этих сцинтилляторов были измерены в зависимости от мощности дозы облучения от 2,3 крад/ч до 1,5 Мрад/ч при поглощенной дозе облучения 10 Мрад.

Результаты измерений, полученные сразу после облучения и спустя 7 сут после восстановления, представлены на рис. 14 соответственно темными квадратами и светлыми треугольниками для всех трех сцинтилляторов. Наблюдается значительное уменьшение световыхода сцинтилляторов с уменьшением мощности дозы облучения. На полулогарифмической прямой, описывающей световойход после облучения, имеется точка расходимости, ниже которой при уменьшении мощности дозы облучения световойход падает во всех сцинтилляторах, а выше этой точки при увеличении мощности дозы облучения либо падает (SCSN-38), либо остается постоянным (SCSN-81), либо увеличивается (BC-499-35). Авторы работы объясняют это различием в проницаемости O_2 в сцинтилляторы и подвижностях молекулярных цепочек сцинтилляторов.

при дозах $> 1,4 \cdot 10^4$ Гр и мощности дозы 52,7 Гр/мин (рис. 12, а).

Все образцы показывают очень слабое уменьшение световыхода при облучении дозой до 50 Гр, а при дозе 600 Гр потери в световыходе у ВС-408 составили 14,1 %, ВС-404 — 13,4 %, EJ-200 — 10,6 % (рис. 12, б). Изменений в световыходе сцинтилляторов после облучения дозой 0,57 Гр за время 100 ч практически не наблюдается (рис. 12, в).

Форма и положение пиков спектров эмиссии трех сцинтилляторов при всех дозах облучения не менялись, что свидетельствует о том, что при этих дозах механизм рождения света ЛД не разрушается. На рис. 13 приведены спектры эмиссии ВС-408.

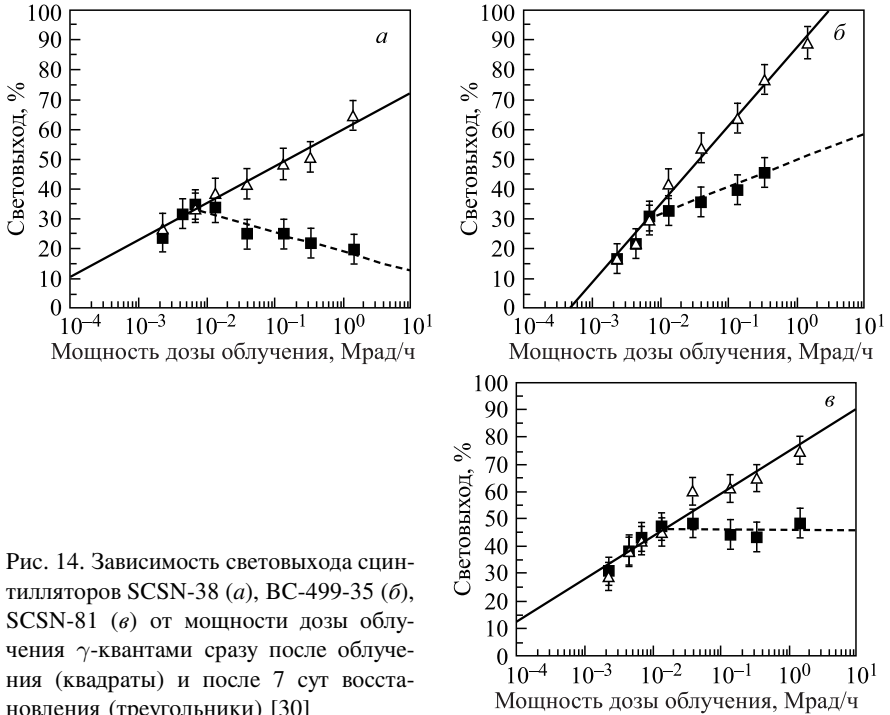


Рис. 14. Зависимость световыхода сцинтилляторов SCSN-38 (а), BC-499-35 (б), SCSN-81 (в) от мощности дозы облучения γ -квантами сразу после облучения (квадраты) и после 7 сут восстановления (треугольники) [30]

Отметим, что ниже точки расхождения световыходы сцинтилляторов спустя 7 сут такие же, как сразу после облучения.

Световыходы сцинтилляторов SCSN-38, SCSN-81 и BC-499-35 после их восстановления хорошо описываются полулогарифмической прямой, угол наклона которой зависит от материала сцинтиллятора и условий проведения облучения (рис. 15). Пользуясь подобной зависимостью, описывающей измерения световыхода какого-то сцинтиллятора, облученного при больших мощностях дозы, можно в некоторых случаях оценить ожидаемый световыход при малых мощностях дозы облучения этого же сцинтиллятора при одной и той же величине поглощенной дозы.

Исследования радиационной стойкости сцинтилляторов SCSN-81 и BC-408, используемых в HE-калориметре, одном из наиболее радиационно-загруженном адронном детекторе спектрометра CMS, были проведены на пучке 8-ТэВ протонов на LHC при интегральной светимости $23,3 \text{ фб}^{-1}$ и очень малых мощностях дозы облучения (10^{-4} – $0,1$ крад/ч) [32]. Кроме того, облучение этих сцинтилляторов было проведено на γ -квантах от ^{60}Co при $0,28$ крад/ч и поглощенной дозе 300 крад.

Световыходы сцинтилляторов измерялись до и после облучения (спустя 6 сут). Результаты световыходов представлены на рис. 16 в виде зависимости

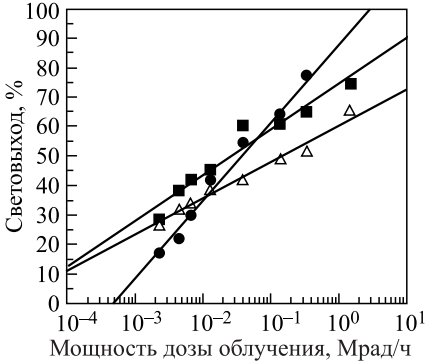


Рис. 15. Световыход сцинтилляторов после 7 сут восстановления в зависимости от мощности дозы облучения γ -квантами: треугольники — SCSN-38, квадраты — SCSN-81, кружки — BC-499-35 [31]

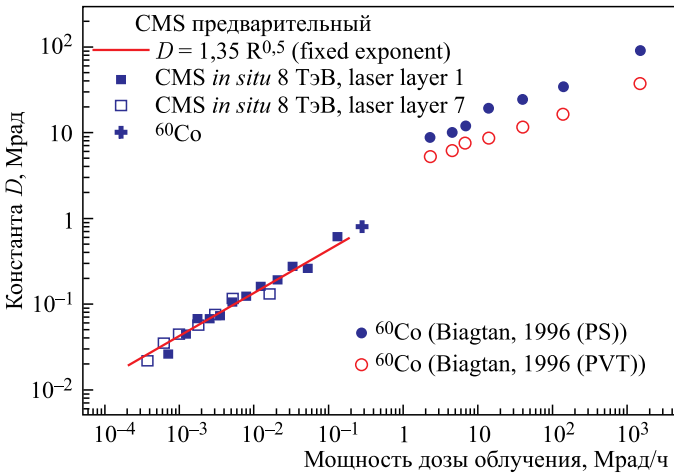


Рис. 16. Зависимость константы D от мощности дозы облучения 8-ТЭВ протонами PS-сцинтилляторов, расположенных в слоях 1 и 7 HE-калориметра CMS, — соответственно темные и светлые квадраты [32]. Крестиком представлен результат, полученный при облучении γ -квантами от ^{60}Co [32]. Здесь же приведены данные, полученные при облучении γ -квантами от ^{60}Co PS- и PVT-сцинтилляторов, обозначенные соответственно темными и светлыми кружками [33]

константы D от мощности дозы облучения, где D — константа, фигурирующая в формуле, описывающей световыход сцинтилляторов в зависимости от дозы облучения d [32]:

$$L(d) = L_0 \exp\left(-\frac{d}{D}\right). \tag{2}$$

Представленные результаты свидетельствуют о значительном уменьшении световыхода с уменьшением мощности дозы облучения. Сравнение этих резуль-

татов с данными, полученными при высоких мощностях облучения γ -квантами [31], показало, что функционально оба набора данных неплохо согласуются между собой.

Влияние мощности дозы на световойход объясняется диффузией O_2 в сцинтиллятор, которая описывается степенной функцией [16]. Отметим, что скорость диффузии O_2 в основном определяется материалом сцинтиллятора. Так, в необлученном PS она в 13 раз выше, чем в PVT [33].

Радиационные испытания проводили в основном на малых образцах сцинтилляторов толщиной от нескольких мм до 1 см, а в работе [34] они были проведены на больших образцах $19 \times 29 \times 120$ см PS и третичного сцинтиллятора из PS с добавками 0,4 % PPO и 0,04 % POPOP, которые облучали γ -квантами от ^{60}Co при дозах от 1 до 10 кГр и мощностях дозы 0,1 и 85 кГр/ч.

При малых мощностях дозы потери в светопередаче (рис. 17, *a*) и световыходе (рис. 17, *б*) больше, чем при больших мощностях дозы, что объясняется различием в процессах образования световых центров и поглощения света в этих световых центрах при взаимодействии O_2 с радикалами. С увеличением дозы облучения потери в светопередаче, а также в интенсивности сигналов (рис. 17, *в*) и механической прочности (рис. 17, *г*) замедляются. Однако положение пика в спектре испускания с увеличением поглощенной дозы не менялось.

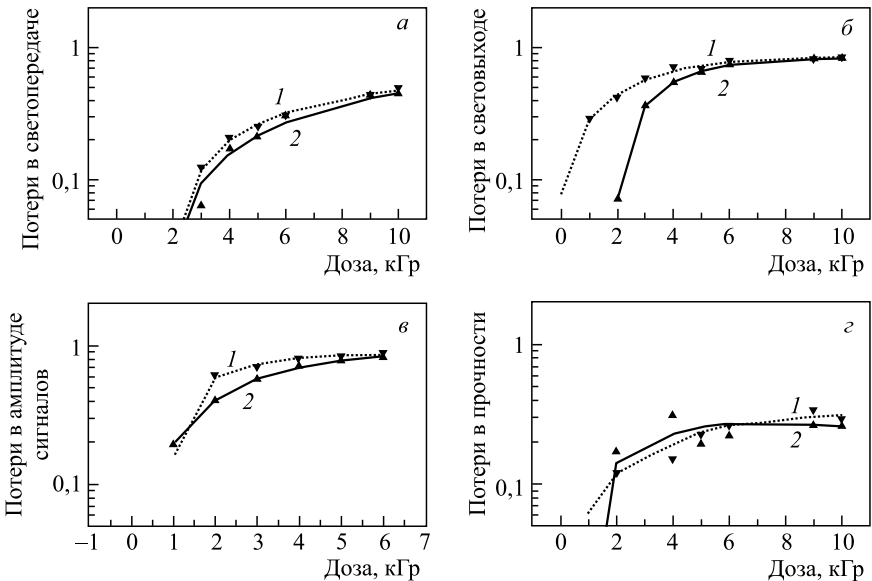


Рис. 17. Потери в светопередаче (*a*), световыходе (*б*), амплитуде сигналов (*в*) и пределе прочности (*г*) сцинтиллятора в зависимости от поглощенной дозы при малой (0,1 кГр/ч) (1) и высокой (8,5 кГр/ч) (2) мощностях дозы облучения [34]

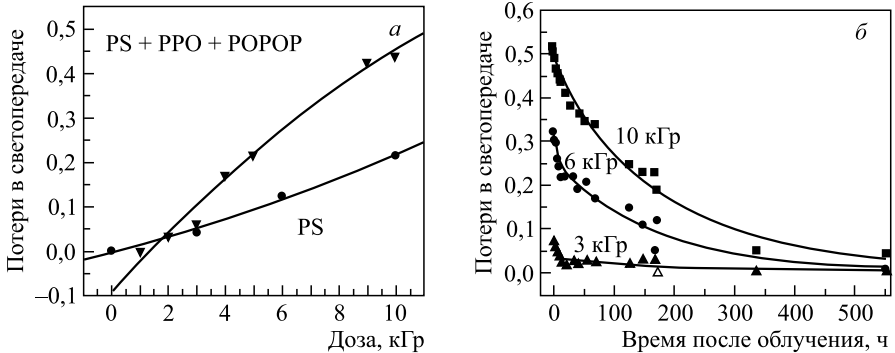


Рис. 18. а) Потери в светопередаче чистого полистирола и сцинтиллятора + 0,4 % PPO + 0,04 % POPOP в зависимости от поглощенной дозы. б) Восстановление светопередачи сцинтиллятора в зависимости от времени после облучения при разных дозах облучения и при $\lambda = 440$ нм [34]

Потери в светопередаче сцинтиллятора с ЛД 0,4 % PPO + 0,04 % POPOP при дозах > 2 кГр оказываются выше, чем в чистом полистироле (рис. 18, а). Восстановление образцов после облучения происходит по экспоненциальному закону и достигает остаточного уровня 5 % в течение около месяца (рис. 18, б).

3.1.4. Исследования радиационной стойкости в пучках нейтронов. Исследования PS-сцинтилляторов, облученных нейтронами, представляют большой практический интерес, так как в электромагнитных и адронных калориметрах, а также в некоторых других частях современных ускорителей в большом количестве рождаются нейтроны. В наиболее радиационно-загруженных местах на LHC за один год эксплуатации ожидается флюенс нейтронов более чем 10^{15} см^{-2} [4].

Исследования радиационной стойкости сцинтилляторов SCSN-38, чистых PS и PMMA GS218 были проведены в пучках нейтронов от ядерного реактора BR1 (Бельгия) и от синхротрона Федерального физико-технического института (РТВ) (Брауншвейг, ФРГ) [35]. Образцы сцинтилляторов имели размеры 10×10 мм и толщину 4 (5) мм. Нейтроны на РТВ рождались в реакции ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$. Нейтронные пучки характеризовались следующими параметрами:

- от РТВ — флюенс $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а фон γ -квантов — 7% от полной дозы, широкий спектр нейтронов со средней энергией 5,2 МэВ;
- от BR1 — флюенс $1,9 \cdot 10^{15} - 4,4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, а фон γ -квантов составлял 5%, спектр нейтронов состоял из 86,5% тепловых, 5,4% изотермических и 8,6% быстрых нейтронов [35].

Пропускающую способность сцинтилляторов T можно описать формулой

$$T(\lambda) = T_0(\lambda) \exp(-\mu(\lambda)t), \quad (3)$$

где μ — коэффициент поглощения; t — толщина сцинтиллятора; T_0 — пропускающая способность до облучения. В случае облученных материалов обычно рассматривают обусловленный радиацией коэффициент поглощения $\Delta\mu$, равный разности между коэффициентами поглощения необлученного и восстановленного после облучения сцинтилляторов.

В области длин волн $\lambda = 380\text{--}400$ нм, где поглощение активатора ВДВ велико, разрушения, вносимые γ -квантами при дозах облучения 154 и 200 кГр, больше, чем вносимые нейтронами (рис. 19, *a*), а при малых дозах облучения (5,2 и 7,0 кГр) разрушения от нейтронов почти в 5 раз больше, чем от γ -квантов (рис. 19, *б*).

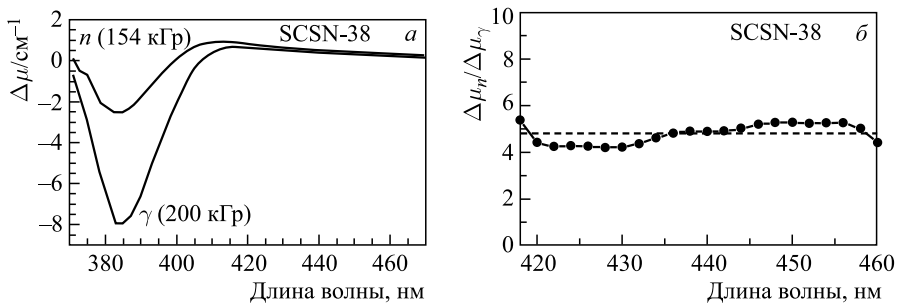


Рис. 19. Зависимость коэффициента поглощения $\Delta\mu$ от длины волны для SCSN-38, облученного нейтронами и γ -квантами дозами 154 и 200 кГр (*a*); отношение коэффициентов поглощения $\Delta\mu$ (нейтронов) к $\Delta\mu$ (γ -квантов) для SCSN-38, облученного нейтронами и γ -квантами дозами 5,2 и 7,0 кГр (*б*) [35]

Сводные данные по зависимости $\Delta\mu$ для PS и SCSN-38, а также для PMMA от дозы облучения нейтронами и γ -квантами приведены на рис. 20, *a* и *б* соответственно.

Нейтроны производят в PS и SCSN-38 почти в 3 раза больше повреждений, чем γ -кванты (рис. 20, *a*), а в PMMA, наоборот, γ -кванты производят в 1,5 раза больше повреждений, чем нейтроны (рис. 20, *б*). В органических сцинтилляторах сечение взаимодействия нейтронов с протонами гораздо больше, чем поглощение γ -квантов, поэтому протоны, возникающие от упругого рассеяния нейтронов в PS, производят больше повреждений в PS, чем в PMMA.

Для улучшения светосбора и повышения радиационной стойкости сцинтилляторов (тайлов), используемых в радиационно-повышенных зонах на современных ускорителях, в частности на калориметрах CMS, предложено заменять отдельные тайлы на несколько стрипов и собирать свет с каждого стрипа WLS-волокном, уложенным в канавку стрипа, а затем суммировать его [36, 37] (рис. 21). Такая сегментация тайла на небольшие («пальчико-

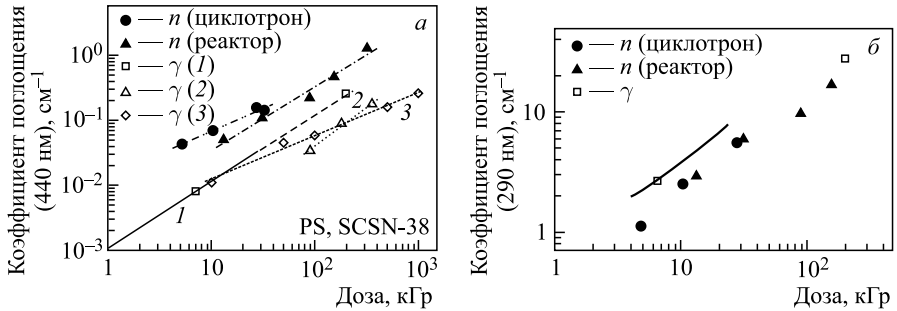


Рис. 20. Зависимость коэффициента поглощения $\Delta\mu$ от дозы облучения нейтронами и γ -квантами для PS и SCSN-38 при $\lambda = 440$ нм (а) и PMMA при $\lambda = 290$ нм (б) [35]

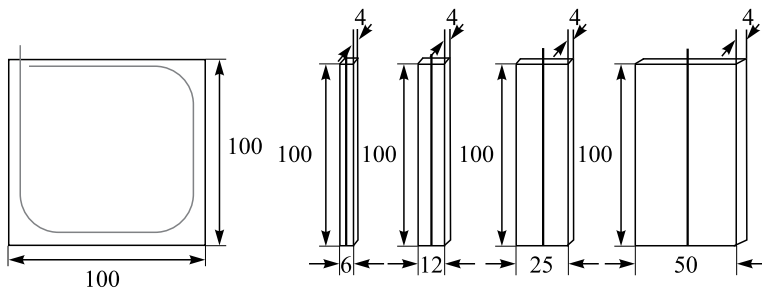


Рис. 21. Тайл размерами 100 × 100 мм и стрипы, ширина которых составляет 6, 12, 25 и 50 мм [36]

вые») стрипы позволяет собирать суммарно больше света, чем с отдельного цельного тайла. Это достигается благодаря тому, что сцинтилляционный свет стрипа от места его рождения до WLS-волокна проходит меньшие расстояния, следовательно, потери его на поглощение и рассеяние уменьшаются. Кроме того, уменьшение пути прохождения сцинтилляционного света означает уменьшение вероятности испытать радиационные повреждения.

Измерения световыхода из тайла 100 × 100 мм и отдельно из 16 стрипов 100 × 6 мм, облученных электронами при дозах 0,5, 1, 5, 10, 30 Мрад, показали, что суммарный световыход из 16 стрипов может превысить световыход из тайла до 40 % (рис. 22, а) [36].

Исследования световыхода нестрипованного тайла SCSN-81 размерами 60 × 40 × 4 мм были проведены на γ -квантах от ⁶⁰Со в зависимости от мощности дозы облучения при суммарных дозах облучения 250 и 600 крад [37] (рис. 22, б). Световыход проявляет зависимость от мощности дозы облучения и имеет тенденцию к уменьшению с убыванием мощности дозы облучения.

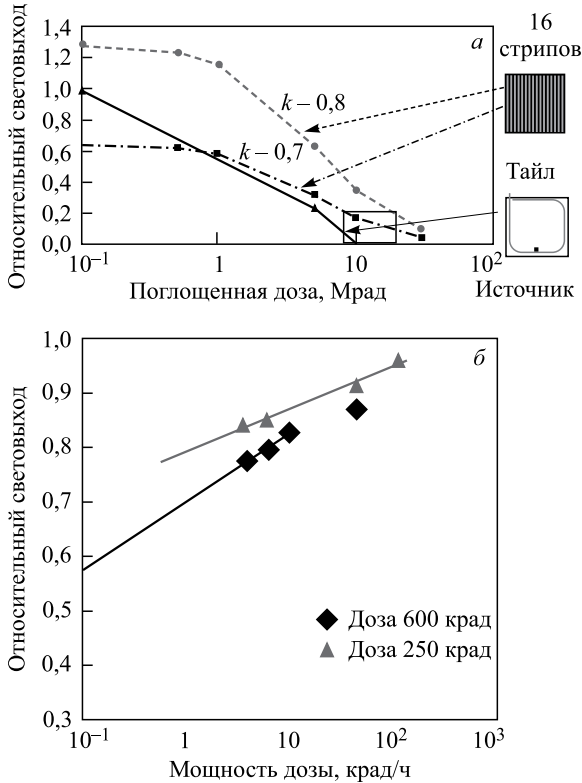


Рис. 22. *а*) Рассчитанные на основе проведенных измерений значения относительных световыходов разных образцов (источник света находился на расстоянии ~ 2 мм от шифтера) [36]. *б*) Относительный световыход нестрипованного тайла SCSN-81 в зависимости от мощности дозы облучения [36]

«Пальчиковые» стрипы ВС-408 и EJ-260 размерами $60 \times 12 \times 4$ мм со светосбором WLS-волокнами Y11 и O-2M Kuragay соответственно облучались γ -квантами от ^{60}Co дозами от 5 до 30 Мрад при мощности дозы от 0,022 до 0,600 Мрад/ч в Институте ядерных проблем (Ташкент). Световыходы этих стрипов (в фотоэлектронах), облученных γ -квантами дозами 20 и 25 Мрад, в зависимости от мощности дозы облучения приведены на рис. 23, *а* и *б* соответственно. При малых мощностях дозы облучения световыход сцинтилляторов значительно ниже, чем при больших мощностях дозы (при одной и той же дозе облучения).

Покраска удаленного от ФД торца волокна серебряной краской улучшила светосбор в 1,45 раза. На рис. 23, *в* приведен световыход стрипа ВС-408 с волокном Kuragay Y11-М, облученным дозой 25 Мрад. Облучение волокна было

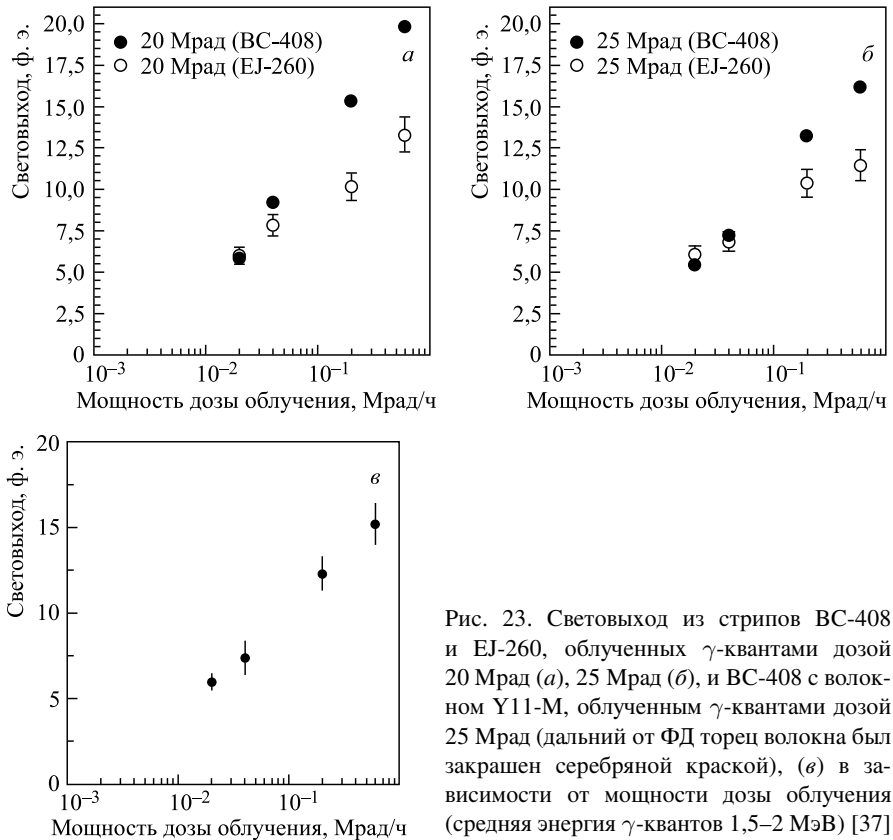


Рис. 23. Световыход из стрипов BC-408 и EJ-260, облученных γ -квантами дозой 20 Мрад (*a*), 25 Мрад (*b*), и BC-408 с волокном Y11-M, облученным γ -квантами дозой 25 Мрад (дальний от ФД торец волокна был покрашен серебряной краской), (*v*) в зависимости от мощности дозы облучения (средняя энергия γ -квантов 1,5–2 МэВ) [37]

проведено электронами с энергией 6 МэВ, а удаленный от ФД торец волокна был покрашен серебряной краской. Световыходы с этого стрипа (рис. 23, *v*) и стрипа, облученного такой же дозой — 25 Мрад, но с необлученным волокном и незакрашенным торцом (рис. 23, *b*), оказались практически одинаковыми. Это означает, что закрашивание торца волокна компенсирует потери света, возникающие в нем при облучении дозой 25 Мрад.

Исследования радиационной стойкости «пальчиковых» стрипов BC-600 и EJ-260 на нейтронах были проведены также на уникальном сооружении — импульсном реакторе быстрых нейтронов ИБР-2 ОИЯИ, который производит нейтроны с плотностью потока до 10^{16} см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ [38]. Стрипы облучались на смешанном пучке, содержащем 85 % нейтронов и 15 % γ -квантов, со средней энергией нейтронов ~ 1 МэВ, γ -квантов 1,5–2 МэВ, флюенс нейтронов составлял $\sim 3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$.

Результаты измерений на нейтронах вместе с результатами измерений на γ -квантах при 20 и 25 Мрад приведены на рис. 24. Потери в свето-

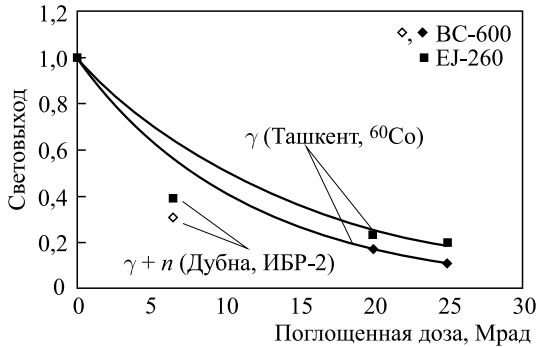


Рис. 24. Относительные световыходы «пальчиковых» стрипов BC-600 и EJ-260, облученных только γ -квантами (Ташкент, ^{60}Co) и смешанным пучком нейтронов и γ -квантов (Дубна, ИБР-2), флюенс нейтронов $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, доза 6,5 Мрад (по пленочному дозиметру) [37]

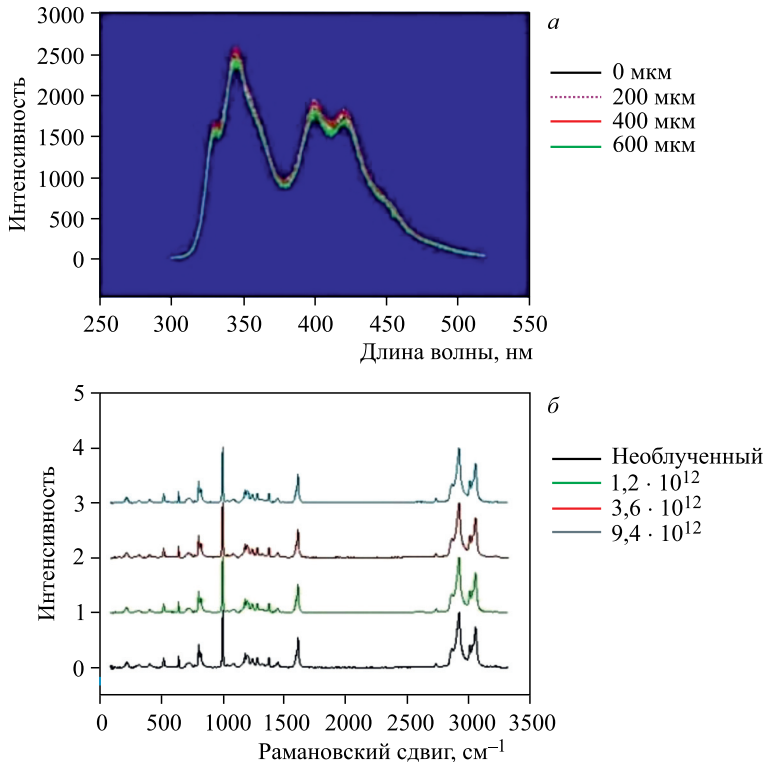


Рис. 25. Эмиссионные (а) и рамановские (б) спектры для EJ-200 [39]

выходе сцинтилляторов, облученных нейтронами, выше, чем при облучении γ -квантами при одной и той же дозе облучения 6,5 Мрад, которая соответствовала флюенсу нейтронов $2,34 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

В рамках модернизации спектрометра ATLAS проведены исследования оптических и структурных изменений в PVT-сцинтилляторах EJ-200, EJ-208, EJ-260 (ELJEN) и PS-сцинтилляторе UPS-928A (ISMA) на пучке нейтронов с энергией до 10 МэВ и флюенсом нейтронов $1,2 \cdot 10^{12} - 9,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ на ИБР-2 ОИЯИ [39].

Отметим, что радиационная стойкость этих же сцинтилляторов ранее была исследована на пучках протонов в широком интервале доз облучения (0,8–80 МГр) [21]. Показано, что сцинтилляторы EJ являются наиболее радиационно стойкими.

При указанных потоках нейтронов эмиссионные (рис. 25, а) и рамановские спектры (рис. 25, б) облученных и необлученных образцов EJ-200 практически совпадают, т.е. структурных изменений в облученных образцах не обнаружено. Пики, наблюдаемые в спектрах в области длин волн 300–375 и 375–500 нм, коррелируют со спектрами излучения основы PS/PVT и ЛД соответственно. То же самое наблюдалось и в других сцинтилляторах ELJEN.

Световыходы сцинтилляторов практически не меняются при изменениях флюенсов нейтронов в интервале $(1-10) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (рис. 26).

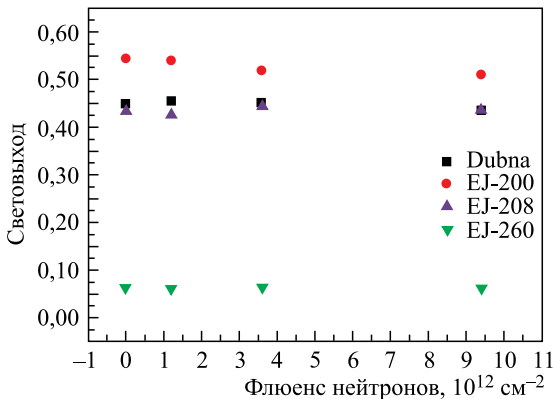


Рис. 26. Световыходы сцинтилляторов EJ-200, EJ-208, EJ-260 в зависимости от флюенса нейтронов [39]

Радиационная стойкость UPS-928A была исследована также при больших флюенсах нейтронов — $3,8 \cdot 10^{12} - 1,8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Световыход сцинтиллятора при наибольших флюенсах нейтронов уменьшился на $\sim 28\%$. Каких-либо структурных изменений и дополнительных пиков эмиссии не было обнаружено.

3.2. Оптические волокна. Оптические волокна (сцинтилирующие, спектросмещающие и чистые) нашли самое широкое применение в современных экспериментах, проводимых как на ускорителях, так и с космическими частицами. Основными мировыми производителями волокон являются Kugaгау [40] и Vicron [41]. Типичная структура поперечных сечений круглых однооболочечных, двухоболочечных и квадратного однооболочечного SciFi-волокон Kugaгау представлена на рис. 27. Толщины оболочек составляют около 3 % от толщины основы. Обычно основа волокна состоит из PS, а первая (внутренняя) оболочка — из PMMA, вторая внешняя — из фторированного PMMA, показатели преломления которых равны 1,59, 1,49 и 1,42 соответственно. Такая структура волокна отвечает эффективному сбору и распространению света вдоль волокна благодаря полному внутреннему отражению на оболочке(ах) волокна (рис. 28). Двухоболочечные волокна позволяют собирать на 50 % больше света, чем однооболочечные, благодаря большему углу захвата света (см. рис. 28).

Сцинтиляционный свет, распространяемый по волокну, претерпевает потери из-за рэлеевского рассеяния на разных его неоднородностях, самопоглощения, а также из-за радиационных повреждений. Эти потери сильно зависят от длины волны света: чем меньше длина волны (λ), тем больше эти

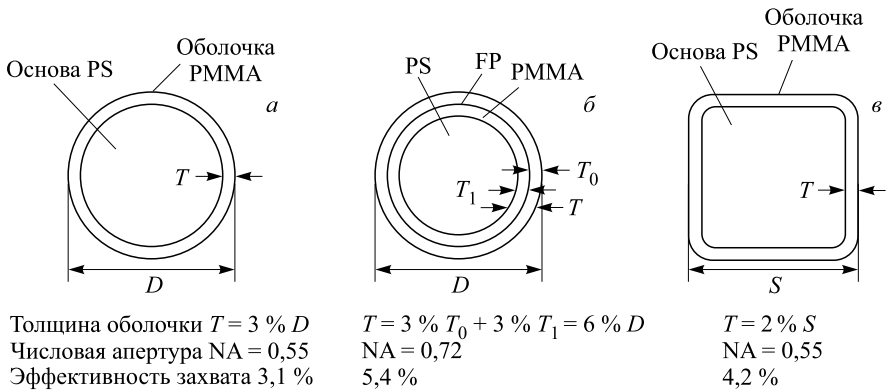


Рис. 27. Структура оптических волокон: круглых однооболочечных (а), двухоболочечных (б) и квадратного однооболочечного (в)

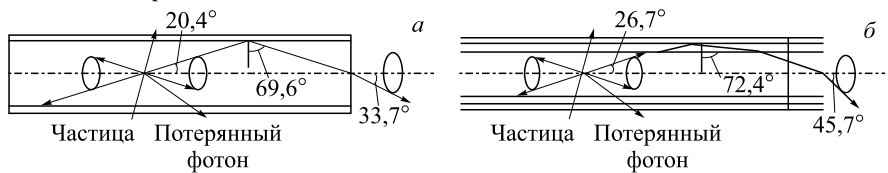


Рис. 28. Схема распространения фотонов в однооболочечном (а) и двухоболочечном (б) волокнах

потери. Потери от рэлеевского рассеяния пропорциональны $\sim 1/\lambda^4$, поэтому фотоны с короткими длинами волн претерпевают существенное поглощение, а фотоны с длинными волнами распространяются с меньшими потерями.

Размеры потерь от рассеяния и самопоглощения зависят от материалы основы волокна и от величины сдвигов Стокса ЛД, т. е. разницы между максимумами спектров испускания первичных добавок и спектров поглощения вторичных добавок. Под действием радиации в материалах волокна рождаются радикалы, на которых как на световых центрах происходят поглощение и рассеяние сцинтилляционного света. Потери из-за радиационных повреждений изучались во многих работах, и некоторые из них будут рассматриваться ниже.

Вместе с SciFi-волокнами используются чистые оптические волокна CF, т. е. волокна без ЛД, в которых фотоны распространяются с меньшими потерями. Длина затухания CF-волокон составляет более 10 м, что почти в 3 раза превышает длину затухания SciFi-волокон. CF-волокна обладают лучшими механическими свойствами, чем SciFi-волокна. Кроме того, как будет показано ниже, CF-волокна являются более радиационно стойкими, чем SciFi-волокна.

В современных экспериментах оптические волокна должны обладать также хорошими механическими свойствами (гибкостью), так как они укладываются в тайлах в канавки, имеющие небольшие радиусы закругления. Хорошей гибкостью обладают волокна S-типа, производимые Kuragaу, так как в них молекулярные структуры основы волокна ориентированы вдоль оси волокна. В связи с этим представляет большой интерес поведение волокон Kuragaу S-типа и CF-волокон в зависимости от параметра S и радиуса закругления в условиях больших радиационных нагрузок.

3.2.1. Сцинтиллирующие и чистые волокна. Сцинтиллирующие волокна (SciFi) широко используются в наиболее радиационно-загрязненных областях ускорителей и при этом выполняют различные функции, такие как измерение светимости детектором ALFA на LHC [42], пространственно-временное разделение частиц волоконным годоскопом на COMPASS [43], разделение частиц по времени пролета на MUSE [44], определение координат треков частиц на D0 [45], LHC [46, 47] и др. Важным достоинством SciFi-волокон является то, что они занимают мало места и вносят минимальное количество вещества.

Для работы на пучке мюонов с импульсами 100–200 ГэВ/с и интенсивностью 10^8 с^{-1} на спектрометре COMPASS был собран многослойный годоскоп из SciFi-волокон SCSN-78MJ диаметром 1 мм [43]. Конфигурация волокон в годоскопе представлена на рис. 29, а. Такой многослойный годоскоп собирал до 20 электронов на один пиксель многоанодного ФЭУ Н6568 с временным разрешением 400 пс. Потери в световыходах 8-мм участка волокна, облученного электронами от ^{90}Sr дозой 10 кГр (рис. 29, б), составили 15 %.

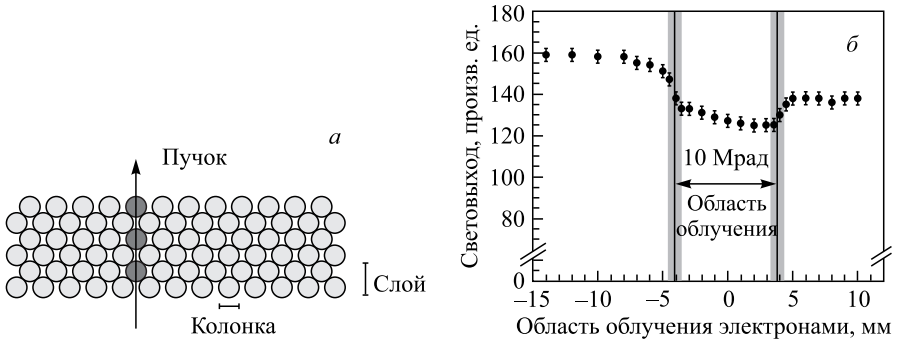


Рис. 29. Расположение волокон в трехслойном годоскопе (а) и световыход волокон Kuraray SCSN-78, облученных на выделенном участке электронами от ^{90}Sr дозой 10 кГр (б) [43]

Чтобы не подвергать ФД большим радиационным нагрузкам, желательно выносить его подальше от пучковой области. Для передачи света от SciFi-волокна на ФД использовали CF-волокно PSMJ Kuraray, которое обладает значительно большей длиной затухания, чем SciFi-волокно.

Склейка волокон SciFi и CF торцами показала, что все использованные клеи под действием радиации портились, теряли свою прозрачность, поэтому вместо склейки авторы производили сварку стыкуемых концов волокон. Для этого полированные торцы волокон плотно прижимали друг к другу и выдерживали в течение нескольких секунд при температуре 105–110 °С. Потери света при прохождении через такой контакт составили < 10 %. Длина затухания CF-волокон под действием дозы 10 кГр уменьшилась более чем в 3 раза. Отметим, что реалистичная оценка дозы облучения показывает, что в зоне гало доза облучения будет на порядок меньше рассмотренной выше дозы.

В рамках проекта модернизации спектрометра LHCb [46, 47] планируется заменить две существующие трековые системы, состоящие из газовых дрейфовых трубок и силиконовых микростриповых детекторов, на волоконный трековый детектор, собранный из SciFi-волокон SCSN-78MJ диаметром 250 мкм. Такой детектор будет обладать двумя преимуществами перед существующей системой: он более однороден и вносит на пути пучка малое количество вещества (1,1 % X_0).

SciFi-волоконный детектор собирается из матриц, составленных из шести слоев плотно уложенных волокон (рис. 30) размерами $130,65 \times 2424,0 \times 1,4$ мм. В отличие от традиционно используемых волокон 3HF, BC-12 и SCSN-81 полистирольная основа волокна SCSN-78MJ содержала добавки (pTP и тетрабутадиен), что способствовало получению большей длины затухания и большего световыхода, чем с других волокон Kuraray [40]. Считывание

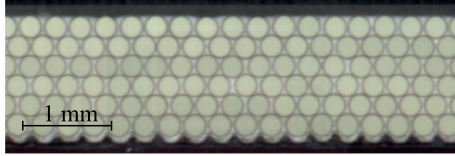


Рис. 30. Поперечное сечение матрицы SciFi-волоконного детектора [46]

сигналов с волокон производилось с одного из его торцов с помощью SiPM, при этом его второй торец был зазеркален.

Детектор будет подвергаться значительным радиационным нагрузкам, которые за 10 лет работы вблизи пучковой трубы могут составить 35 кГр, быстро уменьшаясь по мере удаления от трубы как $\sim 1/r^2$, и на расстоянии от центра трубы $r = 2,5$ м составят 50 Гр.

Радиационные испытания волокон были проведены на установках с разными частицами, имеющими разные энергии. Сводные данные, полученные при облучении протонами, γ -квантами и X -лучами при разных энергиях, приведены на рис. 31. Согласно оценкам ожидаемые потери в световыходах за весь период работы детектора в наиболее радиационно-загруженных областях вблизи пучка составят около 40 %.

Основные характеристики детектора с волокнами SCSN-78MJ длиной 2,4 м были измерены на пион-протонных пучках ЦЕРН и электронных пучках DESY. Световыход с волоконной матрицы составил ~ 16 фотоэлектронов, эффективность регистрации 99 %, а пространственное разрешение 70 мкм [47].

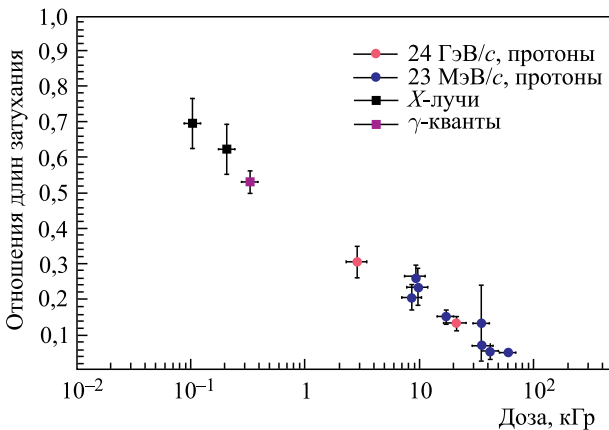


Рис. 31. Сводные данные по зависимости отношений длин затухания после и до облучения волокна SCSN-78MJ от поглощенной дозы облучения разными частицами при разных энергиях [47]

Радиационная стойкость Kuraray 3HF SciFi-волокон S-типа диаметром 0,5–0,75 мм, содержащих 1% рТР и 1500 ppm 3HF, и CF-волокна диаметром 0,8 мм была исследована на ^{60}Co при малых дозах облучения (0,4–500 крад) [48]. Волокна S-типа характеризуются хорошей гибкостью благодаря ориентированности его молекул вдоль волокна. Во многих экспериментах CF-волокна используются для передачи света от SciFi-волокна в удаленный ФД часто через весьма труднодоступные места. В связи с этим представляло интерес изучение радиационной стойкости волокон 3HF SciFi S-типа и CF-волокон в зависимости от параметра S и радиуса кривизны волокон.

Измерение длины затухания волокна 3HF SciFi в зависимости от местоположения ультрафиолетовой лампы засветки и времени, прошедшего после облучения, показало значительное уменьшение длин затухания волокон уже при дозе 10 крад. Длина затухания волокна уменьшилась от 4,5 м (до облучения) до 2,45 м (спустя 13 сут после облучения) (рис. 32). Облучение проводилось ^{60}Co дозой 48 крад при мощности дозы 12 крад/ч.

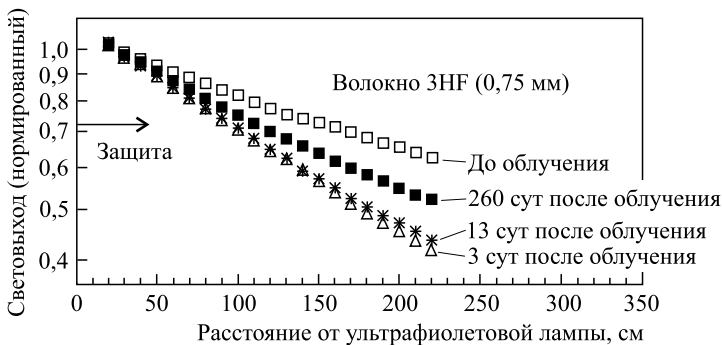


Рис. 32. Световыход волокна 3HF SciFi, измеренный до облучения и спустя 3, 13 и 260 сут после облучения дозой 48 крад, в зависимости от расстояния ультрафиолетовой лампы засветки [48]

Измерения световыхода волокон проводились, начиная с длины 45 см, при меньших длинах волокна были защищены от облучения. На зависимостях относительных длин затухания волокон CF и 3HF после/до облучения от дозы облучения (рис. 33) в области малых доз облучения не видно каких-либо нерегулярностей. Экстраполяция данных, приведенная к нулевой длине, при которой эффект затухания исключен, показывает, что ЛД не разрушаются при примененных дозах облучения, как это наблюдалось во многих работах [19, 30–32].

Отношения длин затухания волокон 3HF и CF после/до облучения в зависимости от дозы облучения ведут себя подобным образом (см. рис. 33). Измерения были проведены спустя 1–2 недели после облучения.

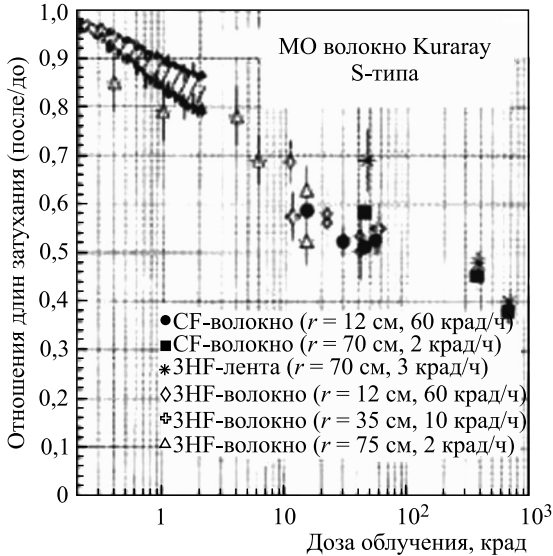


Рис. 33. Отношения длин затухания CF и 3HF многооболочечных (МО) волокон после/до облучения в зависимости от дозы облучения при разных мощностях дозы облучения и радиусах кривизны волокон r [48]. Светлые символы относятся к 3HF-волокнам, темные — к CF-волокнам, а крестики — к 3HF-волокнам, собранным в виде ленты

Существенное восстановление 3HF-волокон происходит в течение нескольких месяцев, скорость его не сильно зависит от мощности дозы 2–12 крад/ч и поглощенной дозы 6–48 крад (рис. 34, а).

Зависимость длины затухания CF-волокон Kuraray от параметра S представлена на рис. 34, б. Длина затухания с увеличением параметра S уменьшается. При $S = 40$ длина затухания 12 м, а при $S = 70$ — 9 м, световыход при этом уменьшается лишь на 30%. При больших значениях S молекулы более ориентированы вдоль оси волокна, оно становится более гибким, но при этом его прозрачность ухудшается и уменьшается длина затухания.

3.2.2. Спектрсмещающие волокна. Спектрсмещающие волокна (WLS) собирают свет от сцинтиллятора, преобразуют его длину и передают его на ФД. Они находят широкое применение в калориметрах, времяпролетных и вето-системах. Воздействие радиации на световыход и пропускающую способность WLS-волокон зависит от их материала, поглощенной дозы облучения, мощности дозы облучения, окружающей среды.

Волокно можно подвергнуть одной и той же дозе облучения либо за короткое время (большая мощность), либо за длительное время (малая мощность). В принципе, результат может получиться разным. Относительно вли-

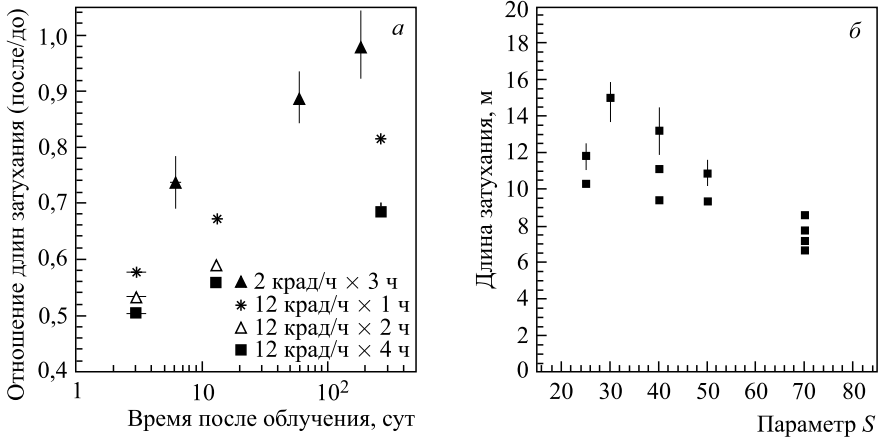


Рис. 34. а) Зависимость отношения длин затухания ЗНФ-волокон, облученных при разных дозах и мощностях дозы облучения, от времени после облучения; б) зависимость длины затухания CF-волокон диаметром 0,8 мм от параметра S [48]

яния мощности дозы облучения на характеристики волокна и восстановление их после облучения имеются противоречивые данные. В одних работах эффект мощности дозы наблюдался [18, 19, 31], а в других проявлялся слабо [16].

WLS-волокна BCF91A-МС, Kuraray Y11(200)MSJ и S250-100 трех разных производителей — Vicron, Kuraray и Pol.-Hi.Tech — были исследованы на радиационную стойкость при дозах 1,16 и 6,93 кГр от ^{60}Co [49]. Волокна имели длину 200 см и диаметр 1 мм. Измерения световыхода и длины затухания волокон были проведены до и после облучения спустя 3 ч, 1 и 6 (10) сут.

Оптические свойства волокон BCF91A-МС и Kuraray Y11(200)MSJ до облучения практически не отличались друг от друга, их длины затухания составляли 280 см, а световыходы отличались не более чем на 2 % (табл. 11). Длина затухания волокна $\Lambda_{\text{зат}}$ Pol.-Hi.Tech S250-100 составляла 230 см, его световыход — 81 % от световыхода двух других типов волокон, а световыходы волокон BCF91A-МС имели большой разброс от волокна к волокну.

Таблица 11. Световыходы (I) необлученных волокон BCF91A-МС и S250-100 относительно световыхода волокон Kuraray Y11(200)MSJ при $x = 140$ см и длины затухания ($\Lambda_{\text{зат}}$) этих волокон до облучения [48]

Тип волокна	$I(x = 140 \text{ см})$	rms, %	$\Lambda_{\text{зат}}$, см	rms, %
BCF91A-МС	0,98	9,6	280	9,5
Y11(200)MSJ	1,00	1,8	280	1,6
S250-100	0,81	5,7	230	5,6

При облучении дозами 1,16 и 6,93 кГр световыходы волокон сразу после облучения уменьшились соответственно на 13 и 29 % (Kuraray), 17 и 46 % (Bicron), 40 и 48 % (Pol.-Hi.Tech) (табл. 12, рис. 35). При дозе облучения 1,16 кГр уменьшение световыходов из волокон Bicron и Kuraray практически одинаково, а при 6,93 кГр отличие в световыходе большое. Изменения в световыходе Pol.-Hi.Tech S 250-100 как при малых, так и при больших дозах значительно больше, чем в Kuraray Y11(200)MSJ.

Таблица 12. Относительные световыходы (R) волокон BCF91A-МС, Kuraray Y11(200)MSJ и S250-100 при $x = 140$ и 30 см, дозах 1,16 и 6,93 кГр

Тип волокна	$R(140)/R(30)$ при 1,16 кГр			$R(140)/R(30)$ при 6,93 кГр		
	0 сут	1 сут	10 сут	0 сут	1 сут	10 сут
	BCF91A-МС	0,83	0,86	0,85	0,54	0,56
Kuraray Y11(200)MSJ	0,87	0,92	0,91	0,71	0,72	0,74
S250-100	0,60	0,70	0,81	0,52	0,55	0,64

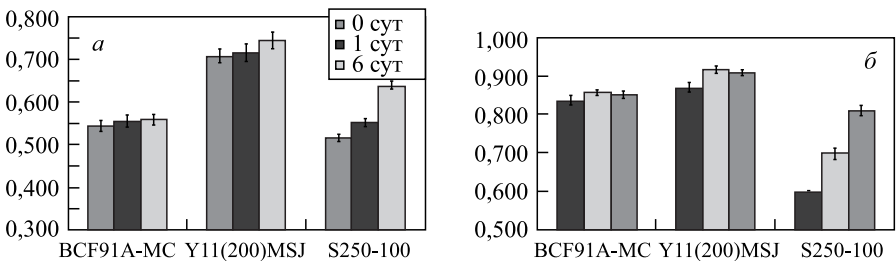


Рис. 35. Отношения световыходов $R(140)/R(30)$ WLS-волокон в зависимости от времени восстановления при дозах облучения 1,16 (а) и 6,93 кГр (б)

По совокупности проведенных измерений волокна Kuraray Y11(200)MSJ показывают лучшие характеристики по световыходу и длине затухания как до, так и после облучения. Радиационная стойкость WLS-волокон разных производителей — BCF99-28, BCF99-28 UVA и BCF91A (DC) (Bicron), Y11(200)MS и Y11(200) MS UVA (Kuraray) и S048-100 N4 и S048-100 UVA (Pol.-Hi.Tech.) — была исследована при малых мощностях дозы облучения γ -квантами от ^{60}Co и при больших мощностях дозы на нейтронах [50]. Все волокна имели основу из PS и оболочку из PMMA, а волокна Kuraray и Bicron — вторую оболочку из фторированного PMMA. Кроме того, все волокна были с ультрафиолетовым поглотителем (UVA) и без него.

Полная доза облучения составляла 140 крад, а мощности доз — 0,55, 1,1 и 4 крад/ч. Результаты сравнивались с данными, полученными при больших дозах облучения (1,5 Мрад/ч) на смешанном пучке исследовательского ядерного реактора (Португалия), состоящем из нейтронов (20 %) и γ -квантов (80 %).

Длины затухания ($\Lambda_{\text{зат}}$) WLS-волокон, измеренные спустя 3 мес. после облучения дозой 140 крад при мощности дозы 0,55 крад/ч, оказались у WLS-волокон Kuraray большими, чем у WLS-волокон двух других производителей (табл. 13).

Таблица 13. Длины затухания ($\Lambda_{\text{зат}}$) волокон до и спустя 3 мес. после облучения при мощности дозы 0,55 крад/ч и поглощенной дозе 140 крад

Тип волокна	$\Lambda_{\text{зат}}$ (до облучения), см	$\Lambda_{\text{зат}}$ (после облучения), см
BCF99-28 без UVA	260	191
BCF600 ppm UVA	198	146
BCF91-A	322	201
Y11(200)MS	303	249
Y11 1000 ppm UVA	306	247
S048 100-N4	315	156
S048-100 с UVA	309	189

Световыходы волокон Vicron и Kuraray не проявляли зависимости от использованных мощностей дозы облучения независимо от наличия или отсутствия UVA-поглотителя в отличие от волокон S048-100 N4, у которых наблюдался эффект использования UVA-поглотителя на уровне 10–15 %.

На рис. 36 представлены световыходы от трех типов волокон — BCF91A, Y11(200) и Y11(200)MS UVA, облученных нейтронами, измеренные спустя 1 ч и от 1 ч до 20 сут после облучения. Нейтроны от ядерного реактора имели пиковую дозу 1 Мрад при мощности дозы 1,5 Мрад/ч. Первичные потери в световыходе составили порядка 80 % для всех волокон, а восстановление до остаточного уровня проходило за 6–20 сут. Остаточный уровень восстановления составил для волокон Kuraray Y11(200) 28 % и для BCF91A — 21 и 24 % соответственно для двухоболочечного и однооболочечного волокон.

В работе [51] изучали радиационную стойкость волокна BC-9929-MS (Vicron) и отдельно сцинтиллятора BC-404 с этим же волокном с помощью радиоактивного источника ^{60}Co . Волокно длиной 30 см облучали дозами от 50 крад до 1 Мрад, а сцинтиллятор с волокном — дозой 200 крад при мощности 4,4 крад/мин. Размеры сцинтиллятора составляли $12 \times 12 \times 1$ см, а длина размещенного в нем волокна — 25 см.

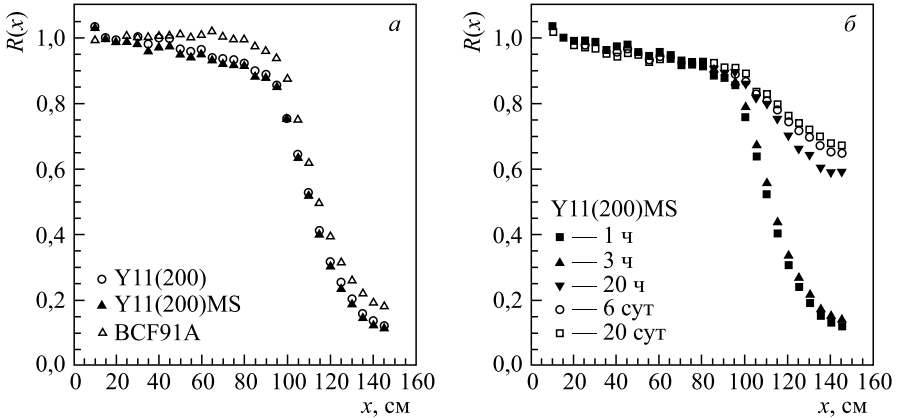


Рис. 36. Отношения световыходов $R(x)$ после/до облучения нейтронами волокон Y11(200), Y11(200)MS, BCF91A спустя 1 ч после облучения (а) и волокон Y11(200)MS после восстановления спустя разное время (б) в зависимости от расстояния до ФД [50]

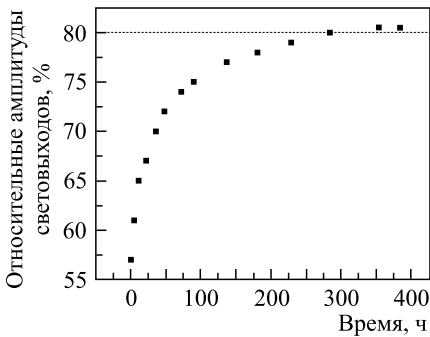


Рис. 37. Относительные амплитудные спектры световыходов (необлученных/облученных) сцинтилляторов с WLS-волоком в зависимости от времени после облучения [51]

Относительные амплитудные спектры световыходов (необлученных/облученных) сцинтилляторов с волоком приведены на рис. 37. 80%-й уровень относительного изменения световыхода достигается в течение длительного времени (300 ч). Это то время, за которое световыход образца выходит на постоянный (остаточный) уровень восстановления.

Волокна облучали дозами 50, 100, 200, 300, 650 крад и 1 Мрад при высокой мощности облучения (7 крад/мин). Измерения световыходов проводили до и после облучения при первых четырех дозах (рис. 38, а) и при более высоких дозах (650 крад и 1 Мрад) (рис. 38, б). Восстановление световыходов в волокне происходит в сотни раз быстрее, чем в системе сцинтиллятор + волокно (рис. 38, а). При дозе 1 Мрад световыход восстанавливается только до 50% от уровня светосбора необлученного волокна.

Изучение радиационной стойкости сцинтилляторов на базе PMMA с добавками Y7 и K27 и световодов GS-218, GS-233, XT20070, облученных

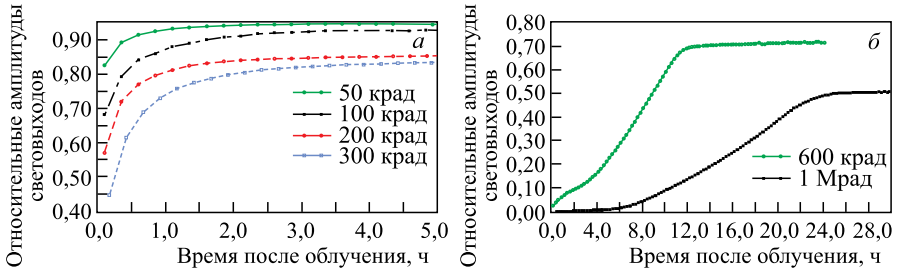


Рис. 38. Относительные световыходы волокон при дозах облучения 50, 100, 200, 300 крад (а) и 650 крад и 1 Мрад (б) в зависимости от времени после облучения [51]

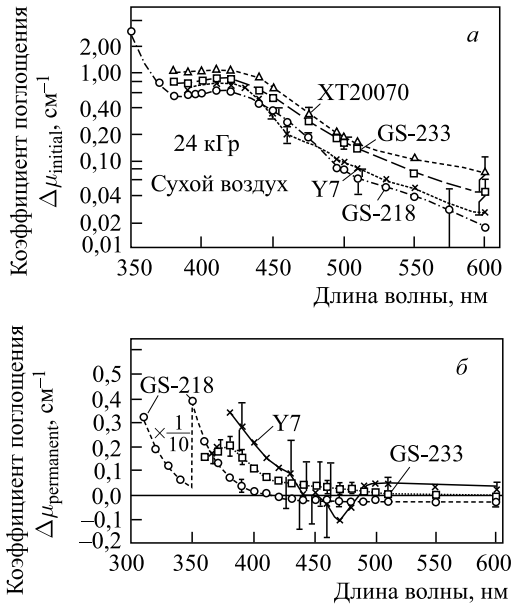


Рис. 39. Спектры поглощения Y7 WLS (30 ppm), световодов GS-218, GS-233 и XT20070, измеренные после кратковременного облучения в сухом воздухе спустя 5–7 сут (а) и 1060 сут после облучения (б), в зависимости от длины волны [16]

γ -квантами от ^{60}Co дозой 24 кГр, представляет интерес с точки зрения изучения роли ЛД и UVA-поглотителя [16]. Спектры поглощения во всех этих материалах, измеренные сразу после облучения, имеют подобное поведение, что показывает, что во всех этих материалах производятся одинаковые центры поглощения и что первичные разрушения связаны с разрушениями матрицы PMMA и возможные нарушения в ЛД и UVA-поглотителе менее важны

(рис. 39, *a*). На рис. 39, *б* представлена зависимость световыходов Y7, GS-218 и GS-233 на остаточный уровень облучения от длины волны.

3.2.3. *Новый тип спектросмещающих волокон.* Сцинтилляционные волокна с очень коротким временем высвечивания и высоким световыходом, основанные на новом типе ЛД (Nanostructured Organosilicon Luminophores — NOL), разрабатываются в Институте синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН (Москва) [52, 53].

В обычном волокне активаторы и смесители спектров (шифтеры) вводятся в матрицу основы (полистирола) независимым и случайным образом, а в новом волокне активаторы и шифтеры в полистироле соединены друг с другом через атомы кремния, как мостиком, на очень коротком (субатомном) расстоянии (рис. 40). Следовательно, передача энергии возбужденных молекул активатора к шифтеру происходит безрадиационно (механизм Форстера) с последующим быстрым высвечиванием шифтера. Подбором люминофоров можно получать волокна с заданными (большими) величинами сдвигов Стокса и отличными временными характеристиками.

На рис. 41 приведены спектры поглощения и эмиссии люминофоров NOL11 и NOL19, которые были использованы при изготовлении прототипов сцинтилляционных волокон BSF-11-1 и GPF-19-1 диаметром 250 мкм. Спектр поглощения NOL11 (NOL19) имеет максимум в синей (зеленой) области, а квантовая эффективность люминесценции ε и время высвечивания τ их равны соответственно 96 % (87 %) и 0,98 нс (0,93 нс) (табл. 14). Для сравнения на рис. 41, *a* приведен также спектр поглощения РОРОР. Как видно, интеграл спектра поглощения обоих люминофоров в ~ 3 раза больше, чем у РОРОР [53].

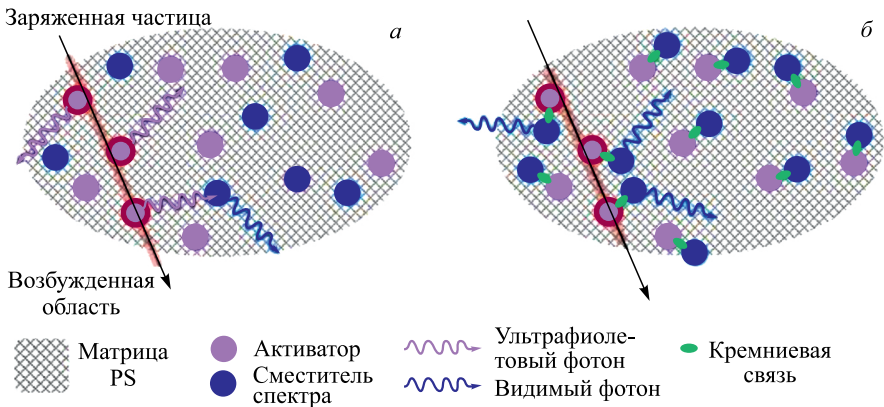


Рис. 40. Принципиальная картина рождения сцинтилляционного света в обычном PS-волокне (*a*) и новом типе PS-волокна с NOL (*б*) [46]

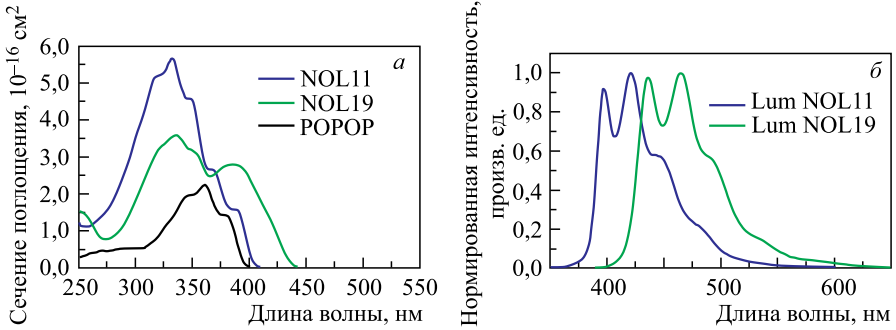


Рис. 41. Спектры поглощения NOL11, NOL19 и POPOP (а) и эмиссии NOL11 и NOL19 (б), использованные как эффективные шифтеры для сцинтилляционных волокон BPF-11-1 GPF-19-1 [53]

Таблица 14. Сводные характеристики люминофоров NOL11 и NOL19 [53]

Люминофор	$\Lambda_{эм}$, нм	ϵ , %	τ , нс
NOL11	391, 421, 445	96	0,98
NOL19	436, 466, 490	87	0,93

Таблица 15. Сводные результаты измерений длин затухания ($\Lambda_{зат}$), световых выходов ($LY_{ф.э}$) и времени высвечивания (τ) обоих прототипов и известных волокон SCSN-78 и SCSN-3HF (для сравнения) [53]

Волокно	$\lambda_{пик}$, нм	$\Lambda_{зат}$, см	$LY_{ф.э}$	τ , нс
BPF-11-1	430	263	23,2	1,34
GPF-19-1	470	294	14,2	1,18
SCSN-78	440	351	27,8	2,36
SCSN-3HF	530	330	23,6	6,18

В табл. 15 приведены сводные результаты измерений длин затухания $\Lambda_{зат}$, световых выходов LY (в фотоэлектронах) и времени высвечивания τ обоих прототипов и для сравнения — эти же данные для наиболее популярных «синего» SCSN-78 и «зеленого» SCSN-3HF волокон.

Авторы рассматривают эти результаты как промежуточные. Оба прототипа показывают очень короткие времена высвечивания, причем у «зеленого» прототипа GPF-19-1 τ в 6 раз меньше, чем у SCSN-3HF, а у «синего» прототипа BPF-11-1 почти в 2 раза меньше, чем у SCSN-78.

Радиационные испытания BPF-11-1 и GPF-19-1, проведенные на X -лучах дозой 1 кГр при мощности дозы облучения 23 Гр/мин, показали, что их радиа-

ционная стойкость сравнима с соответствующими характеристиками известных волокон SCSN-78 и SCSN-3HF. Однако радиационные повреждения, вносимые X -лучами, могут сильно отличаться от повреждений, которые можно ожидать от протонов и других частиц.

3.3. Оптические клеи. В адронных калориметрах используются сцинтилляторы в виде пластин (тайлов), на какой-либо поверхности которых нарезаются канавки для укладки в них WLS-волокон. В нейтринных экспериментах используются длинные сцинтилляционные стрипы с канавками или со сквозными отверстиями, в которых укладываются WLS-волокна. Во всех этих случаях остро стоит вопрос о светосборе с максимально возможной эффективностью.

В последние годы светосбор со сцинтилляторов (тайлов и стрипов) осуществляется WLS-волокнами, уложенными в канавке(ах) на поверхности сцинтилляторов или в сквозных отверстиях в сцинтилляторе не всухую, т.е. не через воздух, а заполненными оптическим клеем (наполнителями), что дает значительный выигрыш в светосборе. При этом оптические клеи должны обладать высокой прозрачностью и показателями преломления, близкими к показателю преломления основы сцинтиллятора или внешней оболочки WLS-волокон, что позволяет уменьшить потери в прохождении света через две границы раздела между сцинтиллятором и наполнителем (первая граница) и наполнителем и внешней оболочкой WLS-волокон (вторая граница).

В эксперименте MINOS WLS-волокна клеивались в канавки на стрипе клеем BC-600, что привело к повышению светосбора до 1,8 раза [54]. Точечные вклейки волокон в канавке стрипа оптическим клеем увеличили светосбор до 1,6 раза [55]. Заполнение сквозного отверстия в стрипе синтетическим низкомолекулярным каучуком СКТН-МЕД дало выигрыш в светосборе в 1,5–1,8 раза в зависимости от длины стрипа [56].

В основном используются клеи на эпоксидной основе — EJ-500, Aqua E-30 (MICE–EMR), Araldite Crystal (для коннекторов MICE–EMR), BC-600 (для SMRD T2K, MINOS, KLOE). Пропускающая способность необлученных клеев EJ-500, Araldite, BC-600 и Aqua E-30 представлена на рис. 42 [57]. Как видно, для первых трех клеев в области длин волн $\lambda > 300$ нм она практически одинакова, в отличие от клея Aqua E-30, светопропускание которого при длинах волн от $\lambda \sim 300$ до ~ 400 нм заметно отличается от первых трех клеев.

Представляет большой интерес изучение радиационной стойкости используемых оптических клеев. Облучение разных наполнителей как в виде смолы (жидкой), так и клея (полимеризованной смолы) и коротких образцов полистирольных стрипов с WLS-волокном с наполнителем и без него проведено на пучке нейтронов с $E > 1$ МэВ от импульсного реактора быстрых нейтронов ИБР-2 ОИЯИ [38]. Значения плотности потоков и флюенсы, полученные образцами при облучении в трех позициях, приведены в табл. 16.

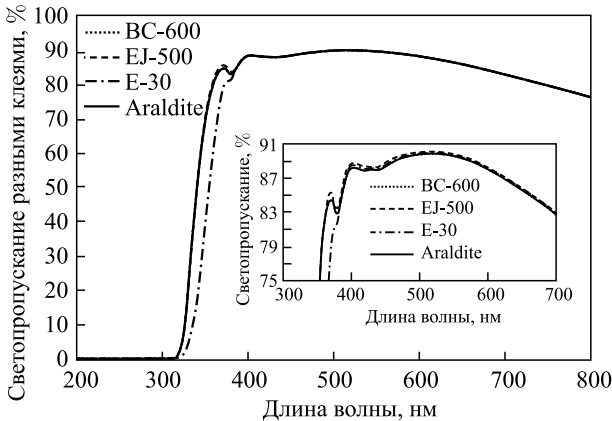


Рис. 42. Светопропускание необлученных клеев EJ-500, Aqua E-30, Araldite Crystal, BC-600 в зависимости от длины волны [57]

Таблица 16. Плотности потока и флюенсы быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ) [38]

Позиция	Плотность потока, $10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Флюенс, 10^{14} см^{-2}	Фон от γ , Мрад
1	18,00	16,0	5,40–1,40
2	4,40	3,8	0,47
3	1,35	1,2	0,37

Толщина слоя смолы и клея составляла около 3 мм. В качестве наполнителя исследовали СКТН-МЕД марок Е и Д, обладающие показателем преломления 1,41 при температуре 25 °С и одинаковой пропускающей способностью (более 95 %), но отличающиеся вязкостью [58]. Кроме того, для сравнения с СКТН-МЕД облучали также широко используемый в разных экспериментах ФВЭ наполнитель BC-600 с показателем преломления 1,57 и пропускающей способностью $> 95\%$ [59].

Пропускающая способность смол (жидкого) и клеев (полимеризованного) СКТН-МЕД (Д) и BC-600, облученных и не облученных нейтронами, измерялась в зависимости от длины волны на спектрофотометре Shimatsu [60] (рис. 43 и 44). Светопередача СКТН-МЕД как смолы (рис. 43, а), так и клея (рис. 43, б) в области $\lambda > 400$ нм остается высокой ($> 95\%$) при всех потоках нейтронов и практически мало отличается от светопередачи их необлученных образцов [61].

Светопередачи смолы (см. рис. 44, а) и клея (см. рис. 44, б) BC-600 оказались весьма чувствительными к облучению нейтронами при всех рассмотренных потоках нейтронов, при этом клей оказался более чувствителен к облучению, чем смола [61]. Подобное поведение для BC-600 наблюдалось также

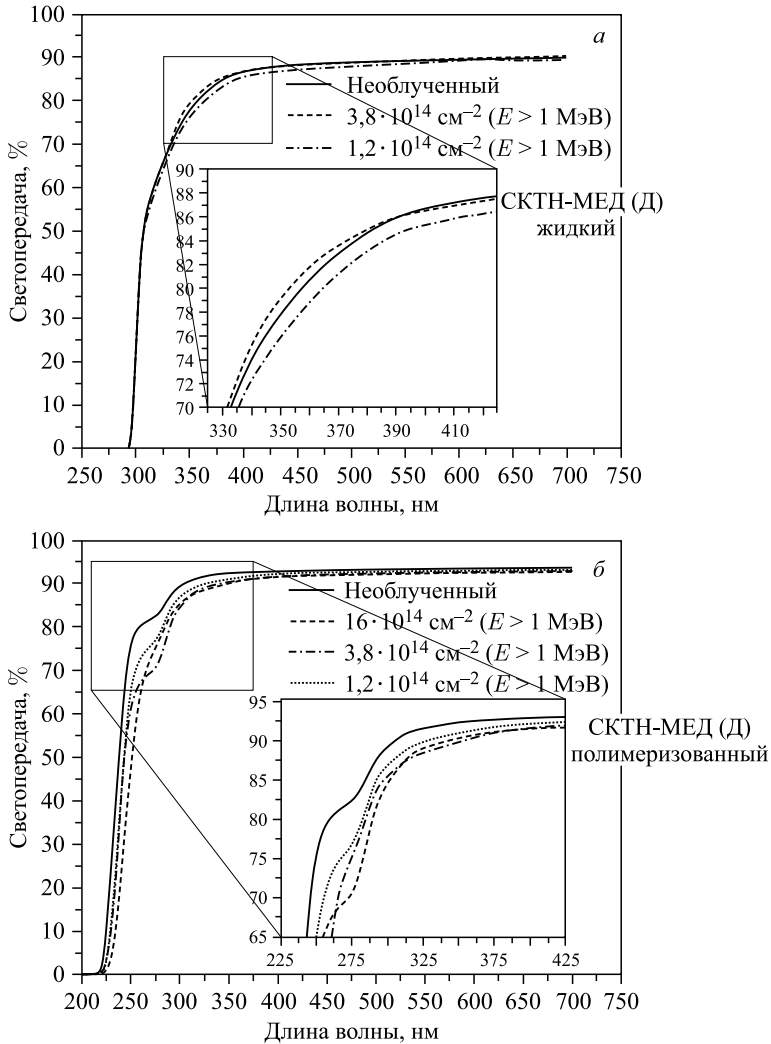


Рис. 43. Зависимость светопередачи СКТН-МЕД (Д) смолы (а) и клея (б) от длины волны до и после облучения нейтронами с флюенсами $16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ [61]

в работе [61], где облучения ВС-600 были проведены γ -квантами от ^{60}Co дозой 27 кГр на образцах клея толщиной 1,5 и 3,0 мм (рис. 45, а).

На рис. 45, б представлена зависимость светопередачи образцов Meltmount, облученных γ -квантами от ^{60}Co дозой 4 кГр, а также нейтронами и прото-

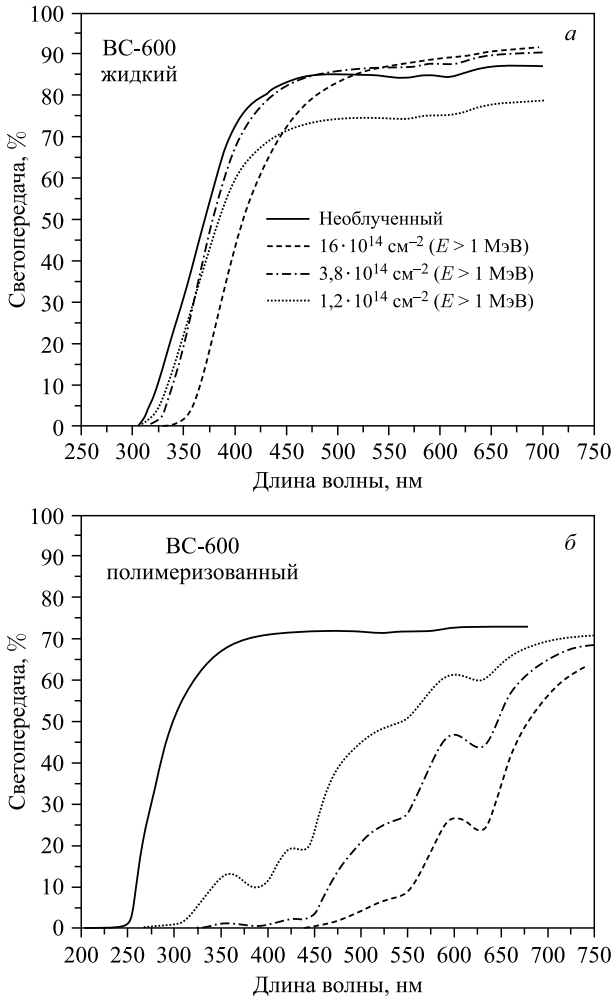


Рис. 44. Зависимость светопередачи ВС-600 смолы (а) и клея (б) от длины волны до и после облучения нейтронами ($16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) [61]

нами с флюенсом $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, от длины волны. Этот клей используется в микроскопах, так же как и ВС-600, для соединения разных оптических элементов. Показатель преломления Melmount — 1,58, а толщина их образцов — 3 мм.

Влияние облучения на световыход коротких образцов стрипов с наполнителем и WLS-волокном изучалось в работе [61]. С этой целью 15-см образцы стрипов с наполнителями СКТН-МЕД (Е), СКТН-МЕД (Д) и ВС-600 и без

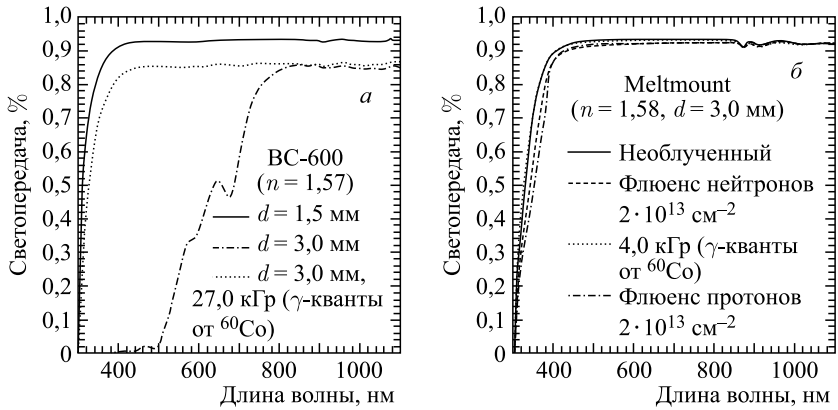


Рис. 45. Зависимость светопередачи клея BC-600, облученного γ -квантами от ^{60}Co дозой 27 кГр, (а) и клея Meltmount, облученного γ -квантами от ^{60}Co дозой 4 кГр, нейтронами и протонами с флюенсом нейтронов $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (б) от длины волны [62]

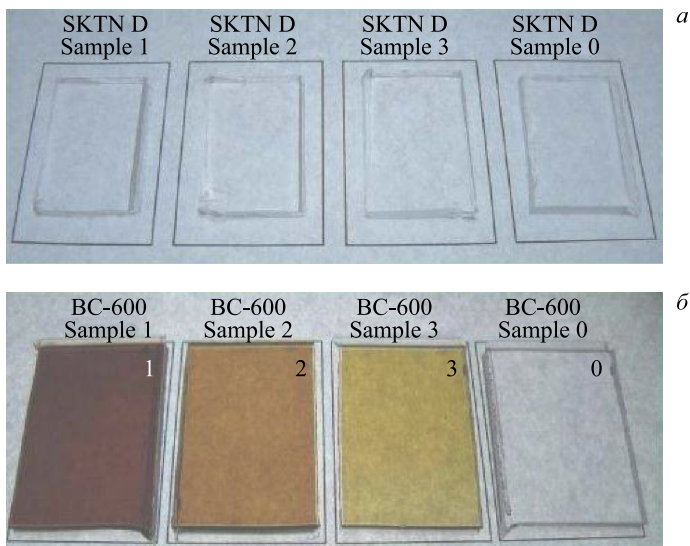


Рис. 46. Пластины, изготовленные из полимеризованных смол СКТН-МЕД (Д) (SKTN (D)) (а) и BC-600 (б), до и после облучения потоками нейтронов с флюенсами $16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ соответственно с номерами 0, 1, 2 и 3 [61]

них были облучены потоками быстрых нейтронов ($E > 1$ МэВ), флюенсы которых составляли $16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на третьем канале реактора ИБР-2 ОИЯИ [38]. Измерения светосбора с «сухих» стрипов и

стрипов с наполнителями на радиоактивных источниках были проведены до и после облучения с помощью пикоамперметра Keithley [63].

Абсолютные анодные токи стрипов для всех трех наполнителей до облучения примерно одинаковы, а после облучения наблюдается их уменьшение по мере увеличения флюенса нейтронов. Так, уменьшение анодных токов облученных образцов СКТН-МЕД (Д) по сравнению с токами необлученных образцов СКТН-МЕД (Д) составило 85, 67 и 30 % при флюенсах нейтронов $16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно. Эти характеристики для СКТН-МЕД (Е) составили 85, 46 и 43 %. Так как пропускающая способность СКТН-МЕД при этих флюенсах практически не менялась, то ухудшение светосбора стрипов было вызвано разрушениями в материалах стрипа и WLS-волокна, что и сказалось на их световыходе.

На рис. 46 приведены фото пластин, изготовленных из полимеризованных смол СКТН-МЕД (Д) (обозначено как SKTN (D)) и BC-600, облученных потоками нейтронов с флюенсами $16 \cdot 10^{14}$, $3,8 \cdot 10^{14}$ и $1,2 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно с номерами 1, 2 и 3. Пластина с номером 0 относится к необлученному образцу. На этих фото хорошо видны различия в воздействии радиации на эти наполнители. На пластинах СКТН-МЕД (Д) практически не наблюдаются изменения в их прозрачности в зависимости от потока нейтронов (рис. 46, а), тогда как на пластинах BC-600 цвет пластин меняется сильно (рис. 46, б).

4. СТАРЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ В ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Оптические характеристики сцинтилляторов могут ухудшаться не только под воздействием радиации, но и под влиянием температуры и влажности окружающей среды, что приводит со временем к пожелтению или даже почернению сцинтилляторов, образованию трещин на поверхности и внутри сцинтиллятора.

Исследования характеристик небольших образцов PS-сцинтилляторов SCSN-81 (Kuraray), UPS-98RH и UPS-923A (ISMA, Kharkov, Ukraine) и PVT-сцинтиллятора BC-408 (Bicron) при нормальной температуре и влажности по-

Таблица 17. Долговременная стабильность световыходов и механической прочности [64]

Сцинтиллятор	T_{20} (20%-е светопропускание), лет	T_{50} (50%-я механическая прочность), лет
SCSN-81	10	6,2
BC-408	6	5,1
UPS-98RH	8	5,8
UPS-923A	10	8,2

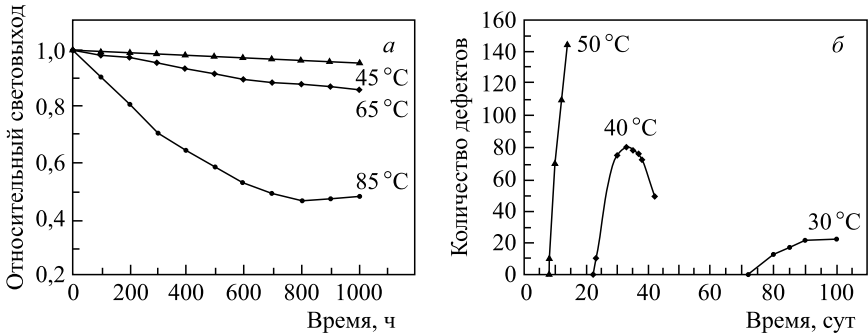


Рис. 47. Изменение световыхода со стрипа в зависимости от времени экспозиции при разных температурах (а) и количество дефектов (трещины), образуемых в стрипе, в зависимости от времени экспозиции в условиях 95%-й влажности при разных температурах (б) [65]

казали хорошую стабильность в течение продолжительного времени. Потеря в световыходе UPS-923A за 10 лет не превышала 20 %, а потеря механической прочности за 8,2 лет не превышала 50 % (табл. 17) [64, 65].

Однако при температуре выше 65 °C третичные PS-сцинтилляторы с 2 % рТР и 0,02 % РОРОР претерпевают существенные потери в световыходе (рис. 47, а), а повышенная влажность приводит к образованию микротрещин, растрескиванию и пожелтению сцинтиллятора и, как следствие, к потерям светосбора за счет рассеивания света. Количество образуемых трещин в сцинтилляторе при влажности 95 % и при трех значениях температуры в зависимости от времени экспозиции приведены на рис. 47, б [17].

Старение сцинтилляторов ВС-92 было исследовано в широком температурном интервале — от -30 до 40 °C [66]. Установлено, что предсказуемое 20%-е изменение в световыходе сцинтиллятора размерами $2 \times 25 \times 25$ см может произойти за 8,7 лет, а сцинтиллятора размерами $1 \times 25 \times 25$ см с/без WLS-волокна — за 12,2 (15,3) лет. Исследование старения волокна Kuraray SCSN-78M было проведено при температурах 40, 55, 70 °C (рис. 48) [67]. Старение волокна происходит в основном из-за повреждений его основы под воздействием O_2 . Оценка, проведенная по графику Аррениуса, показывает, что при температуре 20 °C потери в светосборе в 10 % могут произойти через 5 лет. Этот срок жизни волокна можно увеличить более чем в 2 раза, понизив температуру до 16 °C.

Старение WLS-волокон Kuraray Y11(200)MSJ в естественных условиях исследовалось также в [68]. Эти двухоболочечные волокна с основой из PS, внутренней оболочкой из PMMA, внешней — из фторированного PMMA укладывались в канавках тайлов Tile-калориметра спектрометра ATLAS для съема световых сигналов. Диаметр волокон составлял 1 мм, а длина исследо-

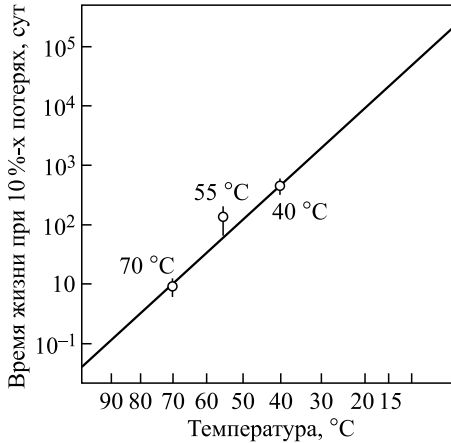


Рис. 48. Время жизни волокна Kuraray SCSN-78M (версия 1.1 тип анти-O₂) в зависимости от температуры [67]

ванных волокон менялась от 114 до 207 см. Половина волокон имела алюминиевое покрытие на одном из торцов, а другая половина не имела его. Потери в световых выводе и длине затухания обоих типов волокон за 4 года составили не более 5%. В пределах 5%-х экспериментальных погрешностей деградации Al-покрытия не наблюдалось.

Влияние температурной обработки на радиационную стойкость сцинтиллятора SCSN-38 и изготовленных на основе PMMA спектросмещающих добавок Y7, K27 и световодов GS-218, GS-233 с адсорбентами UVA (для поглощения черенковского излучения) было изучено как на облученных, так и на необлученных образцах [69].

Таблица 18. Влияние температурной обработки на радиационную стойкость сцинтиллятора SCSN-38 и изготовленных на основе PMMA спектросмещающих добавок Y7, K27 и световодов GS-218 [67]

Процедура	WLS/световод на основе PMMA	SCSN-38
Только нагревание, без облучения	Только у GS-218 сильное дополнительное поглощение при 300 нм	Нет эффекта при 50 °C
Нагревание до облучения	Почти нет эффекта	Рост остаточного уровня разрушений с температурой: при 70 °C — 15% потеря, при 90 °C — 30% потеря
Нагревание после облучения	Все материалы хорошо восстанавливаются в Ag	При 40 °C нет эффекта. При 88 °C остаточный уровень разрушений растет до 70% за 4 дня

Образцы на основе РММА облучались на источнике ^{60}Co дозой 10 кГр при мощности дозы 0,5 кГр/ч, и нагревание их проводили до 110°C в течение 2 ч. Нагревание SCSN-38 проводили до 90°C в течение 24 ч. Результаты исследований светопередачи приведены в табл. 18.

ВЫВОДЫ

Сцинтилляционные детекторы на базе органических пластических сцинтилляторов (ОПС) и оптических волокон являются одними из базовых детекторов в современных ускорительных, астрофизических и нейтринных экспериментах. В связи с модернизацией действующих и строительством новых ускорителей проявляется повышенный интерес к долговременной стабильности и надежности их работы в условиях значительно возрастающих радиационных нагрузок.

Радиационные повреждения (РП) в органических сцинтилляторах проявляются в ухудшении их световыхода, светопередачи, механических и временных характеристик, а также в процессах их восстановления. Масштабы РП зависят от многих факторов — дозы и мощности дозы облучения, типа облучающих частиц, материалов сцинтиллятора, окружающей среды. В последние годы проводятся интенсивные исследования известных сцинтилляторов и оптических волокон и поиски новых материалов, которые можно будет применять в условиях повышенных радиационных нагрузок.

Основываясь на опыте использования сцинтилляционных детекторов в течение последних двух-трех десятилетий и результатах исследований последних лет (хотя большинство из них носит пока предварительный характер), можно сделать некоторые выводы, которые условно можно разделить на две части. К первой части относятся результаты, полученные в «старых» исследованиях, проведенных при дозах облучения до 1 МГр (преимущественно при дозах облучения до нескольких сот кГр), а ко второй — результаты исследований последних нескольких лет.

Часть первая:

1. РП органических сцинтилляторов и оптических волокон растут с уменьшением мощности дозы облучения при одинаковых или близких дозах облучения.
2. РП в PS, вносимые нейтронами при близких дозах облучения 5,2 и 7,0 кГр, выше в 5 раз, чем вносимые γ -квантами, а в РММА — наоборот.
3. РП органических сцинтилляторов и оптических волокон в основном обусловлены разрушениями в матрице основы, а не в ЛД, хотя при этом форма и положение эмиссионных пиков остаются неизменными.
4. Восстановление органических ароматических PS- и PVT-сцинтилляторов происходит в O_2 гораздо быстрее, чем в атмосфере инертных газов,

и, наоборот, восстановление акриловых РММА-сцинтилляторов происходит быстрее в атмосфере инертных газов, чем в O_2 .

5. Восстановление оптических волокон происходит в сотни раз быстрее, чем системы сцинтиллятор + волокно, при одних и тех же дозах облучения.

6. Остаточный (невосстанавливаемый) уровень световыхода составляет 5–15 %.

7. Длина затухания оптически чистых волокон с увеличением параметра S (выстроенности молекул основы волокна вдоль его оси) уменьшается.

8. Старение ОПС в естественных условиях (при нормальной температуре и влажности) происходит медленно, а с понижением температуры замедляется еще более и может составить > 10 лет.

Часть вторая:

1. При высоких радиационных нагрузках (> 25 МГр) сцинтилляторы из PVT (ELJEN) проявляют большую радиационную стойкость, чем сцинтилляторы из PS.

2. Радиационную стойкость сцинтилляторов можно повысить увеличением концентрации ЛД и использованием ЛД, спектр излучения которых продвинул в зеленую область.

3. Оптические волокна на базе новых люминофоров NOL11 и NOL19 при высокой эффективности их люминесценции обладают очень короткими временами высвечивания — 1,34 и 1,18 нс.

4. Сцинтилляторы на базе полиэтиленнафталата (PEN) наряду с хорошей радиационной стойкостью показывают короткие времена восстановления, кроме того, они очень дешевые.

5. Время и уровень восстановления PEN можно значительно улучшить за счет возбуждения облученного образца PEN светодиодной матрицей RGB спектром излучения в синей области.

6. Сегментация тайлов на стрипы («пальчиковые» стрипы) повышает не только их световыход, но и радиационную стойкость.

7. Ухудшение световыхода сцинтиллятора, вызванного РП, можно частично компенсировать за счет повышения светосбора с помощью оптического клея — синтетического низкомолекулярного каучука СКТН-МЕД, вводимого между волокном и сцинтиллятором.

8. СКТН-МЕД наряду с высокими оптическими свойствами обладает большей радиационной стойкостью, чем другие известные оптические клеи. Светопередача СКТН-МЕД, облученного нейтронами с флюенсом до $1,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в области $\lambda > 400$ нм, практически не отличается от необлученного и составляет более 90 %.

Автор признателен и благодарен своим коллегам Ю. Будагову, В. Глаголеву, Ю. Давыдову, А. Артикову, З. Усубову, Д. Чохели, В. Баранову, И. Васильеву, А. Симоненко за внимание и поддержку при выполнении этой работы.

Детекторы и ускорители, упомянутые в обзоре

ЦЕРН — Европейская организация ядерных исследований:

LHC (Large Hadron Collider) — большой адронный коллайдер в ЦЕРН со встречными pp -пучками с энергией 14 ТэВ в с.ц.м., светимостью $2 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и частотой встреч 40 МГц.

HL-LHC (High Luminosity LHC) — модернизированный LHC, в котором светимость планируется на уровне $5 \cdot 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (к 2025 г.).

FCC (Future Circular Collider) — планируемый ускоритель с энергией 100 ТэВ, который, в принципе, должен заменить LHC (к 2032 г.).

ATLAS (A Toroidal Large ApparatuS) и CMS (Compact Muon Solenoid) — многоцелевые спектрометры на LHC, предназначенные для поиска и исследования хиггс-бозонов, суперсимметричных и других частиц.

ALFA — один из детекторов спектрометра ATLAS, предназначенный для измерения светимости LHC с высокой точностью при протон-протонном рассеянии на малые углы.

Tile-калориметр — адронный калориметр спектрометра ATLAS.

MBTS — адронный детектор в области зазора в спектрометре Tile-калориметра.

HE — торцевой адронный калориметр спектрометра CMS.

LHCb (Large Hadron Collider beauty) — одноплечевой спектрометр на LHC, предназначенный для исследования CP-асимметрии и редких распадов B -мезонов.

COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) — спектрометр на SPS для исследования структуры нуклонов и спектроскопии адронов во взаимодействиях поляризованных мюонных и адронных пучков с импульсами 160 ГэВ/с с поляризованной дейтронной мишенью.

FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) — Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми (Батавия США), где работал протон-антипротонный коллайдер (тэватрон) с энергией в с.ц.м. 1,96 ТэВ и светимостью $\sim 3 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

D0 и CDF — два главных спектрометра на тэватроне, предназначенных для исследования рождения тяжелых кварков, для поиска новых частиц и явлений. Тэватрон прекратил свою работу в 2011 г. в связи с запуском LHC в ЦЕРН.

MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Detector) — детектор, предназначенный для исследования осцилляций мюонных нейтрино.

Mu2e — эксперимент во FNAL по поиску очень редких процессов кон-версии μ -мезонов в электроны.

ОИЯИ — Объединенный институт ядерных исследований:

NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) — строящийся в ОИЯИ коллайдер тяжелых ионов.

ИБР-2 — импульсный реактор на быстрых нейтронах ОИЯИ, флюенс нейтронов на котором может достигать 10^{16} см⁻².

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) — строящийся ускорительный комплекс для исследований с антипротонами и ионами в GSI (Дармштадт, Германия).

MUSE (MUon-proton Scattering Experiment) — эксперимент по исследованию рассеяния мюонов на протонах (PSI — Институт Пауля Шеррера, Швейцария).

T2K (Tokai to Kamioka, Япония) — подземный ν -детектор для исследований ν -осцилляций.

SMRD T2K (Side Muon Range Detector) — мюон-пробежный детектор на T2K-спектрометре.

KLOE (K-Long Experiment) — детектор в Национальной лаборатории Фраскати (Италия) для исследований нарушений CP-инвариантности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Birks J. B.* The Theory and Practice of Scintillation Counting. London: Pergamon Press, 1964.
2. *Ruchti R. C.* The Use of Scintillating Fibers for Charged Particle Tracking // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1996. V. 46. P. 281–319.
3. *Kharzheev Yu. N.* Scintillation Counters in Modern High-Energy Physics Experiments // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, No. 4. P. 678–728;
Kharzheev Yu. Scintillation Detectors in Modern High Energy Physics Experiments and Prospect of Their Use in Future Experiments // J. Laser. Opt. Photonics. 2017. V. 4, Iss. 1. P. 1000148.
4. LHC Mashine // J. Instr. 2008. V. 3. P. S08001.
5. *Zimmermann F.* // First FCC Physics Workshop, CERN, Jan. 16–20, 2017.
6. https://www.gsi.de/forschung_beschleuniger/fair.htm
7. *Kekelidze V. D. et al. (NICA Collab.).* Design and Construction of Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) Conceptual Design Report. <http://nica.jinr.ru>.
8. *ATLAS Collab.* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // J. Instr. 2008. V. 3. P. S08003.
9. *CMS Collab.* The CMS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // Ibid. P. S08004.
10. *LHCb Collab.* The Large Hadron Collider Beauty Experiment at the CERN Large Hadron Collider // Ibid. P. S08005.

11. Bartoszek L. et al. (*Mu2e Collab.*). Mu2e Technical Design Report. FERMILAB-TM-2594, FERMILAB-DESIGN-2014-01; arXiv:1501.05241.
12. Förster T. Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz // *Ann. Phys.* 1947. V. 437. P. 55.
13. White T. O. Scintillating Fibers // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1988. V. 273. P. 82.
14. Britvich G. I., Peresykin A. I., Rykalin V. I., Vasil'chenko V. G., Kornilovskaya L. D., Malinovskaya S. A., Skripkina V. T., Shershukov V. M., Yushko E. G., Kulichenko A. V., Pyshchev A. I. Radiation Damage Studies on Polystyrene-Based Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1993. V. 326. P. 483–488.
15. Wood R. J., Pikaev A. K. Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing. New York: Wiley, 1994.
16. Wick K., Paul D., Schröder P., Stieber V., Bicken B. Recovery and Dose Rate Dependence of Radiation Damage in Scintillators, Wavelength Shifters and Light Guides // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1991. V. 61. P. 472–486.
17. Senchishin V. G., Markley F., Lebedev V. N., Kovtun V. E., Koba V. S., Kuznichenko A. V., Tizkaja V. D., Budagov J. A., Bellettini G., Sehnozbenkova V. P., Zalubovskiy I. I., Chirikov-Zorin I. E. A New Radiation Stable Plastic Scintillator // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1995. V. 360. P. 253–257.
18. Bross A. D., Pla-Dalmau A. Radiation Effects in Intrinsic 3HF Scintillator // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1993. V. 327. P. 337–345;
Bross A. D., Pla-Dalmau A. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1992. V. NS-39. P. 1199.
19. Zorn C., Bowen M., Majewski S., Walker J., Wojcik R. A New Polyvinyltoluene-Based, Radiation-Resistant Plastic Scintillator // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1998. V. 271. P. 701–703;
Zorn C. A. Pedestrian Guide to Radiation Damage in Plastic Scintillators // *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)*. 1993. V. 32. P. 377–383.
20. Emanuel N., Buchachenko A. Chemical Physics of Polymer Degradation and Stabilization. VNU Sci. Press, 1987.
21. Liao S. et al. A Comparative Study of the Radiation Hardness of Plastic Scintillators for the Upgrade of the Tile Calorimeter of the ATLAS Detector // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2015. V. 645. P. 012021;
Jivan H., Mdhluli J. E., Sideras-Haddad E., Mellado B., Erasmus R., Madhuku M. Radiation Damage Effects on the Optical Properties of Plastic Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2017. V. 409. P. 224–228.
22. Rykalin V., Brekhovskikh V., Chernichenko S., Gorin A., Semenov V. Development of the Polystyrene Scintillator Technology and Particle Detectors on Their Base // *J. Phys. Sci. (Appl.)* 2015. V. 5. P. 6–13.
23. ISMA (Institute for Scintillation Materials). Kharkov, Ukraine. www.isma.kharkov.ua/eng/.
24. Bicron Corp. 12345 Kisman Rd. Newbury ON 440 USA. www.crystals.saint-gobain.com.

25. *The CMS HCAL Collab.* Brightness and Uniformity Measurements of Plastic Scintillator Tiles at the CERN H2 Test Beam // *J. Instr.* 2018. V. 13. P. 01002. P. 1–10.
26. <http://www.eljentechnology.com/>
27. *Tiras E., Wetzel J., Bilki B., Winn D., Onel Y.* Development of Radiation Hard Scintillators. arXiv:1611.05228v1 [physics.ins-det].
28. Scintirex Brand Scintillator. http://www.teijin.com/news/2011/ebd110907_00.html (accessed: 2016-11-02).
29. *Wetzel J. et al.* Using LEDs to Simulate the Recovery of Radiation Damage to Plastic Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2017. V. 395. P. 13–16.
30. *Zhao L. et al.* Properties of Plastic Scintillators after Irradiation // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. V. 552. P. 449–455.
31. *Biagtan E. et al.* Effect of Gamma Radiation Dose Rate on the Light Output of Commercial Polymer Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1994. V. 93. P. 296–301.
32. *Khachatryan V. et al.* Dose Rate Effects in the Radiation Damage of the Plastic Scintillators of the CMS Hadron Endcup Calorimeter // *J. Instr.* 2016. V. 11. P. T10004.
33. *Trimmer P. C., Schlenoff J. B., Johnson K. F.* Spatially Resolved UV-vis Characterization of Radiation-Induced Color Centers in Poly(styrene) and Poly(vinyltoluene) // *Radiat. Phys. Chem.* 1993. V. 41. P. 57.
34. *Hamada M. et al.* Radiation Damage Studies on the Optical and Mechanical Properties of Plastic Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 442. P. 148–154.
35. *Bodmann B., Holm U.* Neutron-Irradiated Plastic Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2000. V. 185. P. 299–304.
36. *Afanasiev S. V., de Barbaro P., Golutvin I. A., Emeliantchik I. F., Malakhov A. I., Moisenz P. V., Smirnov V. A., Shumeiko N. M.* Improvement of Radiation Hardness of the Sampling Calorimeters Based on Plastic Scintillators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2013. V. 717. P. 11–13.
37. *Afanasiev S. V. et al.* Light Yield Measurements of “Finger” Structured and Unstructured Scintillators after Gamma and Neutron Irradiation // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2016. V. 818. P. 26–31.
38. *Bulavin M., Cheplakov A., Kukhtin V., Kulagin E., Kulikov S., Shabalin E. A., Verkhoglyadov A.* Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor for Investigation of Material Radiation Hardness // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2015. V. 343. P. 26–29.
39. *Mdhului J. E. et al.* High Fluence Neutron Radiation of Plastic Scintillators for the TileCal of the ATLAS Detector // High Energy Particle Physics Workshop 2017. IOP Conf. Ser. J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 889. P. 012009.
40. Kuraray Corp. Japan. Wavelength Shifting Fibers. <http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>.
41. Bicon Corp. U.S.A. Scintillating Fibers. http://www.crystals.saint-gobain.com/Scintillating_Fiber.aspx.
42. *Ask S. et al. (ATLAS Collab.).* Luminosity Measurement at ATLAS — Development, Construction and Test of Scintillating Fibre Prototype Detectors // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 568. P. 588–600.

43. *Bislinghoff J. et al.* A Scintillating Fibre Hodoscope for High Rate Applications // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 490. P. 101–111.
44. *Erez O., Piasetzky C.E., Shamai Y., Pilip N.* Development of a Scintillating-Fiber Beam Detector for the MUSE Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 815. P. 75–82.
45. *Abazov V.M. et al. (D0 Collab.).* Upgraded D0 Detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 565. P. 463–532.
46. *Joram C., Haefeli G., Leverington B.* Scintillating Fibre Tracking at High Luminosity Colliders // J. Instr. 2015. V. 10. P. CO8005.
47. *Hopchev P.* SciFi: A Large Scintillating Fibre Tracker for LHCb. arXiv:1710.08325v1 [physics.ins-det].
48. *Hara K., Hata K., Kim S., Mishina M., Sano M., Seiya Y., Takikawa K., Tanaka M., Yasuoka K.* Radiation Hardness and Mechanical Durability of Kuraray Optical Fibers // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 411. P. 31–40.
49. *Varanda M.J., David M., Gomes A., Maio A.* Recent Results of Radiation Hardness Tests of WLS Fibers for the ATLAS Tilecal Hadronic Calorimeters // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 255–258.
50. *Maio A., David M., Gomes A.* Dose Rate Effects in WLS Fibers // Nucl. Phys. B. (Proc. Suppl.). 1997. V. 54. P. 222–228.
51. *Alfaro R., Cruz E., Martinez M.I., Montañó L.M., Paic G., Sandoval A.* Radiation Hardness Tests of a Scintillation Detector with Wavelength Shifting Fiber Readout // Particles and Fields, Part A. X Mexican Workshop on Particles and Fields, 2006.
52. *Ponomarenko S.A. et al.* Nanostructured Organosilicon Luminophores and Their Application in Highly Efficient Plastic Scintillators // Sci. Rep. 2014. V. 4. P. 6549.
53. *Borshchev O., Cavalcante A.B.R., Gavardi L., Gruber L.C., Joram C., Ponomarenko S., Shinji O., Surin N.* Development of a New Class of Scintillating Fibres with Very Short Decay Time and High Light Yield // J. Instr. 2017. V. 12. P05013.
54. *Michael D.G., Trevor J., Sousa A., Jensen D., Becker B.R. et al.* The Magnetized Steel and Scintillator Calorimeters of the MINOS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 596. P. 190–228.
55. *Britvich G.I., Brekhovskikh V.V., Semenov V.K., Kholodenko S.S.* The Main Characteristics of Polystyrene Scintillators Produced at the Institute of High-Energy Physics and Detectors on Their Basis // Instr. Exp. Tech. 2015. V. 58, No. 2. P. 211–230.
56. *Artikov A., Baranov V., Budagov Yu., Chokheli D., Davydov Yu., Glagolev V., Kharzhev Yu. et al.* Optimization of the Light Yield by Injecting an Optical Filler into the Co-Extruded Hole of the Plastic Scintillation Bar // J. Instr. 2016. V. 11. P. T05003.
57. *Noak E., Schneider T.* Aida Optical Glue Transmission Tests. CERN. Feb. 20, 2013.
58. Research and Production Enterprise SYREL. Russia. CKTN-MED Low Molecular-Weight Rubber. <http://www.surel.ru/silicone/77/>.

59. Bicon Corp. USA. BC-600. Optical Cement. http://www.crystals.saintgobain.com/.../sgc-bc600-data-sheet_69724.pdf.
60. Spectrophotometer. SolidSpec-3700 DUV SHIMATSU, Japan.
61. Artikov A., Baranov V., Budagov Yu., Bulavin M., Chokheli D., Davydov Yu. I., Glagolev V., Kharzheev Yu., Kolomoets V., Simonenko A., Usubov Z., Vasiljev I. Light Yield and Radiation Hardness Studies of Scintillator Strips with a Filler. arXiv:1711.11393v1 [physics.ins-det].
62. Kirn Th., Haring M., Schmitz D., Schulz W. Absorption Length, Radiation Hardness and Ageing of Different Optical Glues. CMS NOTE 1999/003. P. 1–6.
63. Keithley 6487. picoammeter//www.keithley.com.
64. Грунев В. Д., Сенчишин В. Г. Пластмассовые сцинтилляторы. Харьков: Акта, 2003.
65. Artikov A., Budagov J., Chirikov-Zorin I., Chokheli D., Lyablin M., Belletini G., Menziona A., Tokar S., Giokaris N., Manousakis-Katsikakis A. Properties of the Ukraine Polystyrene-Based Plastic Scintillator UPS 923A // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 555. P. 125–131.
66. Zhou, Tianfui He, Huihai Sheng, Xiang Dong. The Long-Term Stability of Plastic Scintillator for Electromagnetic Particle Detectors // 32nd Intern. Cosmic Ray Conf., Beijing, 2011.
67. Susuki A. et al. Design, Construction, and Operation of SciFi Tracking Detector for K2K Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 453. P. 165–176.
68. Silva J., Maio A., Pina J., Santos J., Saraiva J. G. Ageing Studies of Wavelength Shifter Fibers for the TILECAL/ATLAS Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 580. P. 318–321.
69. Bicken B., Dannemann A., Holm U., Neumann Th., Wick K. Influence of Temperature Treatment on Radiation Stability of Plastic Scintillator and Wave-Length Shifter // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1992. V. 39, Iss. 5. P. 1212–1216.