1. Введение

Одним из перспективных материалов, существенно расширяющих область применения детекторов одиночных заряженных частиц, является аэрогель на основе SiO_2/1/. Так, использование этого материала в качестве радиаторов пороговых черенковских счетчиков позволяет отказаться от газовых счетчиков высокого давления, а также продвинутся в область скоростей частиц, где невозможно применение других материалов. В настоящее время аэрогель может изготавливаться с показателями преломления в диапазоне от n = 1,006 до n = 1,075 (плотность ρ = 0,03 - 0,36 г/см^3)/2/, что дает возможность создавать пороговые счетчики, способные производить разделение частиц в области β от 0,93 до 0,99. Путем дальнейшей термообработки аэрогеля возможно повышение показателя преломления до n = 1,25 и более (ρ=1,19 г/см^3)/3/. Таким образом, аэрогель уже полностью перекрывает по плотности и по показателю преломления интервал между газами и твердыми телами.

Однако аэрогель обладает и рядом существенных недостатков: сильная зависимость его прозрачности от длины волны в коротковолновой части спектра видимого света и почти полная непрозрачность в области ультрафиолета; значительное рассеяние света в области коротких длин волн, приводящее к потере направленности излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ) при больших длинах радиаторов; трудности с механической обработкой и др. Эти факторы существенно препятствуют собиранию света на фотоприемник, особенно в случае радиаторов больших размеров.

Использование сместителя спектра для улучшения светосбора на фотоприемник в случае радиаторов малых размеров, когда ультрафиолетовая часть ИВЧ еще может выходить из радиатора, впервые было предложено в /4/. Эта идея использовать сместитель спектра для увеличения сигнала от черенковских счетчиков нашла дальнейшее развитие в случае радиаторов больших размеров при внедрении в объем аэрогеля световодов, изготовленные в виде прямоугольных пластин содержащих сместитель спектра/5/. Результаты моделирования откликов нескольких вариантов таких черенковских счетчиков, проектируемых для работы в составе детектора КЕДР, показали, что можно добиться существенного сокращения количества ФЭУ за счет выигрыша в светосборе. Там же было сделано предположение, что можно получить дополнительный выигрыш в количестве собираемого света, если удастся внедрить вещество, являющееся сместителем спектра, непосредственно в материал аэрогеля.

Технология допирования аэрогеля известным сместителем спектра 1,4-ди-(2-(5-фенилоксазол))-бензол (POPOP) впервые была разработана в Университете им.Коменского, Братислава /6/. Допирование аэрогеля сместителем спектра приводит к тому, что электромагнитное излучение, возникающее в результате взаимодействия заряженных частиц с атомами вещества аэрогеля, может быть захвачено абсорбированным

POPOP и переизлучено в диапазоне длин волн, для которых, с одной стороны аэрогель прозрачен, а с другой, которые более соответствуют максимальной квантовой чувствительности фотокатодов ФЭУ. Так может быть переизлучена и использована значительная часть излучения в коротковолновой области спектра, которая практически не может быть использована в случае обычного аэрогеля. Процесс переизлучения приводит также к увеличению времени высвечивания.

Таким образом, излучение аэрогеля с имплантированным POPOP обладает всеми атрибутами люминисценции, а допированый сместителем спектра аэрогель может рассматриваться и использоваться в качестве сцинтиллятора. Это открывает новую возможность применения аэрогеля в разнообразных сцинтилляционных счетчиках.

2. Приготовление SiO_2-аэрогеля и способ его допирования POPOP

SiO_2-аэрогель был изготовлен путем сверхкритической сушки алкогеля (T=270^{o}C; p=12МПа), полученного гидролизом раствора тетраметоксисилана в метиловом спирте в слабощелочной среде аммиака с последующей выдержкой в метиловом спирте при нормальных условиях в течение 7 суток. Отношения объемов тетраметоксисилана, метилового спирта и воды в первоначальном растворе было 2:2:1, соответственно. SiO_2-аэрогель затем подвергался обжигу при температуре 400^{o}C в течение 5 часов. Полученные образцы имели плотность ρ=0,18 г/см^3 и показатель преломления n=1,038.

Два образца из SiO_2-аэрогеля, имевшие форму цилиндров диаметром 25 мм и высотой 20 мм, выдерживались в атмосфере паров POPOP при температуре t=245^{o}C и пониженном давлении p=150 Па, в течение 7 часов (образец N1) и 24 часов (образец N2). Весовые концентрации абсорбированного аэрогелем сместителя спектра в результате составили 0,7% и 2,5%, соответственно.

Допированые образцы имели слабый коричневатый оттенок по сравнению с чистым аэрогелем. Облучение ультрафиолетовым светом показало, что проникновение сместителя спектра по объему аэрогеля неравномерное - основная концентрация POPOP, особенно в случае образца N1, сосредоточена в поверхностном слое толщиной несколько миллиметров.

В измерениях также использовался контрольный образец чистого аэрогеля, имевший те же размеры, что и допированые образцы.

гелей

азцов аэрогелей
и к … змеренные на
спе … ия и излучения
РО … значительному
сни … концентрация
РО … , допирование
выз … ости в диапазоне
дли … димому, с рас-
сея …

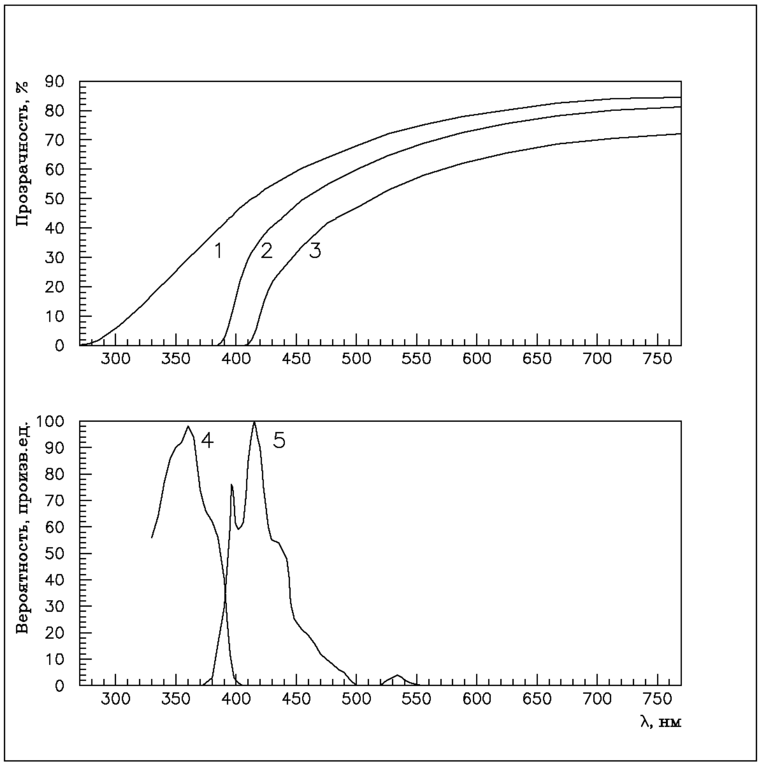

Рис. 1. Прозрачность исследованных образцов аэрогеля в зависимости от длины волны света:
1 - чистый аэрогель, 2 - образец N1, 3 - образец N2.
Кривые 4 и 5 - спектры возбуждения и поглощения POPOP в полистироле.

4. Исследование кинетики излучения сцинтиллятора на

основе аэрогеля

Исследование кинетики излучения проводилось методом счета отдельных фотонов/8/. Схема измерений приведена на рис.2. Исследуемый образец облучался электронами от радиоактивного источника Ru^{106} (максимальная энергия 3,55 МэВ). Сигнал, запускающий время-цифровой преобразователь (ВЦП) с чувствительностью 20 пс/канал, вырабатывался в результате совпадения импульсов от фотоумножителей ФЭУ1 и ФЭУ2 (XP1020), которые регистрировали свет, возникающий в сцинтилляторе (полистирол, 2% паратерфенил, 0,2% POPOP) толщиной 4 мм в результате попадания в него электронов, прошедших через исследуемый образец аэрогеля. Сцинтиллятор располагался в 30 мм за аэрогелем. Сигналом "Стоп" для ВЦП служил импульс от ФЭУ3 (XP2020), который регистрировал свет от аэрогеля. Интенсивность этого света ослаблялась с помощью диафрагмы настолько, чтобы сигнал от ФЭУ3 соответствовал в среднем 0,05 фотоэлектронам. Напряжение на ФЭУ3, коэффициент усиления усилителя и порог регистрации формирователя соответствовали однофотоэлектронному

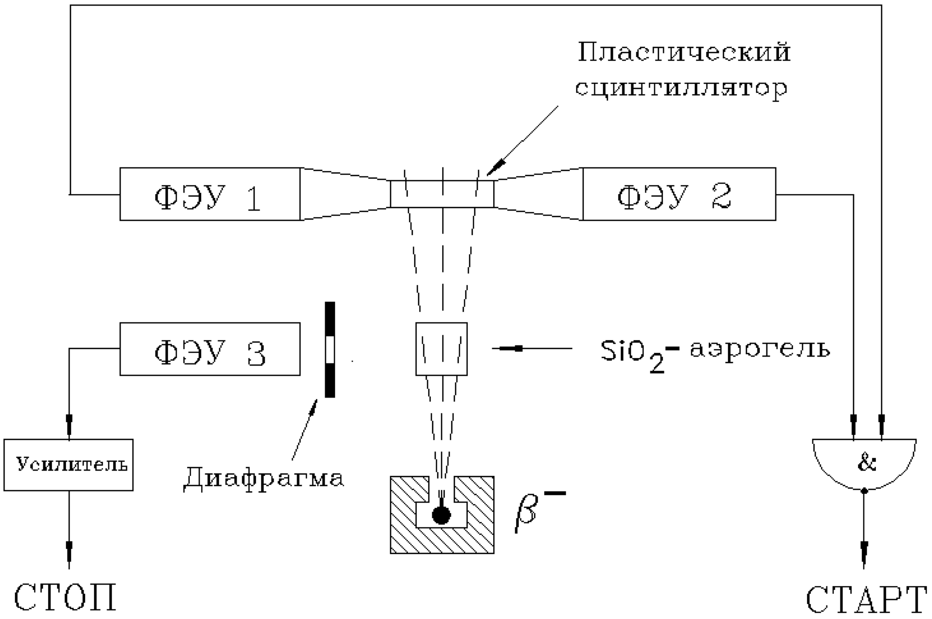

Рис. 2. Схема аппаратуры для изучения кинетики излучения допированого аэрогеля

В полученные результаты вносилась коррекция Δt на корреляцию между измеренным временем и амплитудой А регистрируемого сигнала от ФЭУ3: $\Delta t = K/\sqrt{A}$, где константа K находилась из условия наилучшего временного разрешения при измерении функции аппаратурного разрешения. Функция аппаратурного разрешения была найдена путем измерения временного спектра ИВЧ в чистом аэрогеле.

аных образцов

и к чения чистого

аэр .

енные спектры

пре і за-

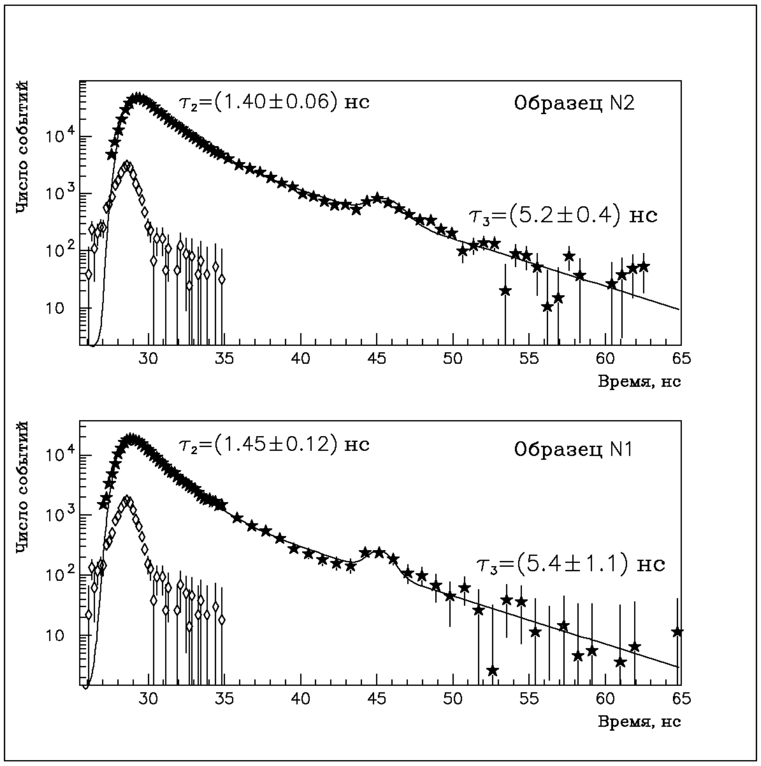

Рис. 3. Временные спектры излучения аэрогельных сцинтилляторов с фитирующими кривыми. Ромбиками изображен спектр излучения чистого аэрогеля.

висимости, которая применяется для описания высвечивания дву- и трехкомпонентных органических сцинтилляторов/9/:

$$i(t) = \frac{\frac{e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1}}{\tau_2 - \tau_1} + \frac{R}{\tau_3} e^{-t/\tau_3}}{1+R},$$

где τ_1, τ_2 и τ_3 - соответственно постоянные времен нарастания вспышки и высвечивания быстрой и медленной компонент, R - коэффициент, пропорциональный вкладу медленной компоненты высвечивания в полную интенсивность вспышки.

Помимо основного максимума в спектрах излучения образцов приблизительно через 15 нс наблюдается дополнительный пик, величина которого составляет около 1/80 от амплитуды основного пика. Происхождение его связано с эффектом регистрации послеимпульсов ФЭУ/9/. Аппаратурный пик послеимпульсов также учитывался при фитировании. В результате были найдены следующие значения параметров: τ_2 = 1,40±0,06 нс (55±11% от полной интенсивности) и τ_3 = 5,2±0.4 нс (45±9% от полной интенсивности) для образца N1 и τ_2 = 1,45±0,12 нс (68±30%) и τ_3 = 5,4±1,1 нс (32±11%) для образца N2.

В случае возбуждения излучения аэрогеля электронами от источника Ru^{106} естественно предположить, что регистрируемый свет является результатом переизлучения ИВЧ сместителем спектра (максимальная энергия частиц от источника E_{max}=3,55 МэВ существенно превышает пороговую энергию для возникновения ИВЧ ($E_{пор}$=1,4 МэВ). Присутствие медленной компоненты высвечивания можно было бы связать с процессом переизлучения сместителем спектра своего собственного излучения, так как спектр его излучения и поглощения значительно перекрываются.

Временные спектры излучения исследуемых образцов были также измерены при облучении их электронами от источника Tl^{204}, максимальная энергия которых E_{max}=760 кэВ, что значительно ниже порога возникновения ИВЧ в исследуемых образцах. В случае контрольного образца не наблюдалось свечения аэрогеля, а для допированых аэрогелей полученный временной спектр оказался таким же, как и при облучении электронами от источника Ru^{106}. В данном случае основную роль при возбуждении POPOP могут играть тормозное и переходное излучения, возникающее при движении электронов в образце, возбуждение самого POPOP, а также, возможные радиационные или безрадиационные механизмы передачи энергии от возбужденного вещества кварца.

Исследование
их α-частицами с
частицами. Обра
без каких-либо д
гигроскопических
В случае облу в.
Сигналы от ФЭУ
пКл/канал. Пока
фотоэлектронов с дные
спектры сигналов
облучении прямо
фенила, 0,2% PO я
на стекло ФЭУ.

N1) всего в 3

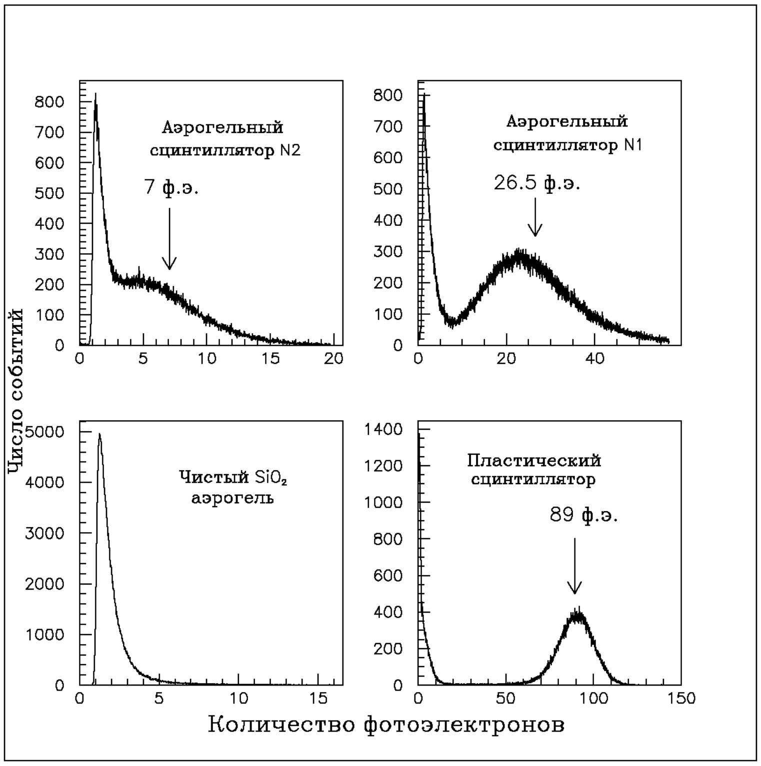

Рис. 4. Амплитудные спектры сигналов от ФЭУ при облучении аэрогелей и пластического сцинтиллятора α-частицами от Pu^{239}.

раза уступает по техническому световыходу сцинтиллятору, световыход которого оценивается в 24% от световыхода $NaI(Tl)$. Центр тяжести распределения соответствует 26,5 регистрируемым фотоэлектронам. Технический световыход образца N2 оказался еще в 4 раза меньше, хотя содержание POPOP в нем значительно выше. Этот результат можно понять, принимая во внимание, что свободный пробег α-частиц в аэрогеле не превосходит 0,5 мм. Поглощение и рассеяние света в материале самого аэрогеля на пути к ФЭУ приводит к более сильному ослаблению сигнала от образца с большим содержанием POPOP. При облучении контрольного образца не было замечено какого-либо свечения.

Схема измерений световыхода аэрогелей под действием космических частиц показана на рис.5. Телескоп из двух сцинтилляционных счетчиков выделял космические частицы, которые пересекали исследуемый образец в диапазоне углов от 0^o до 20^o. Сигнал от ФЭУ усиливался зарядово-чувствительным усилителем и поступал на АЦП с чувствительностью 1 пКл/канал. Совпадение сигналов от сцинтилляционных счетчиков и испытываемого счетчика приводило к выработке стробирующего

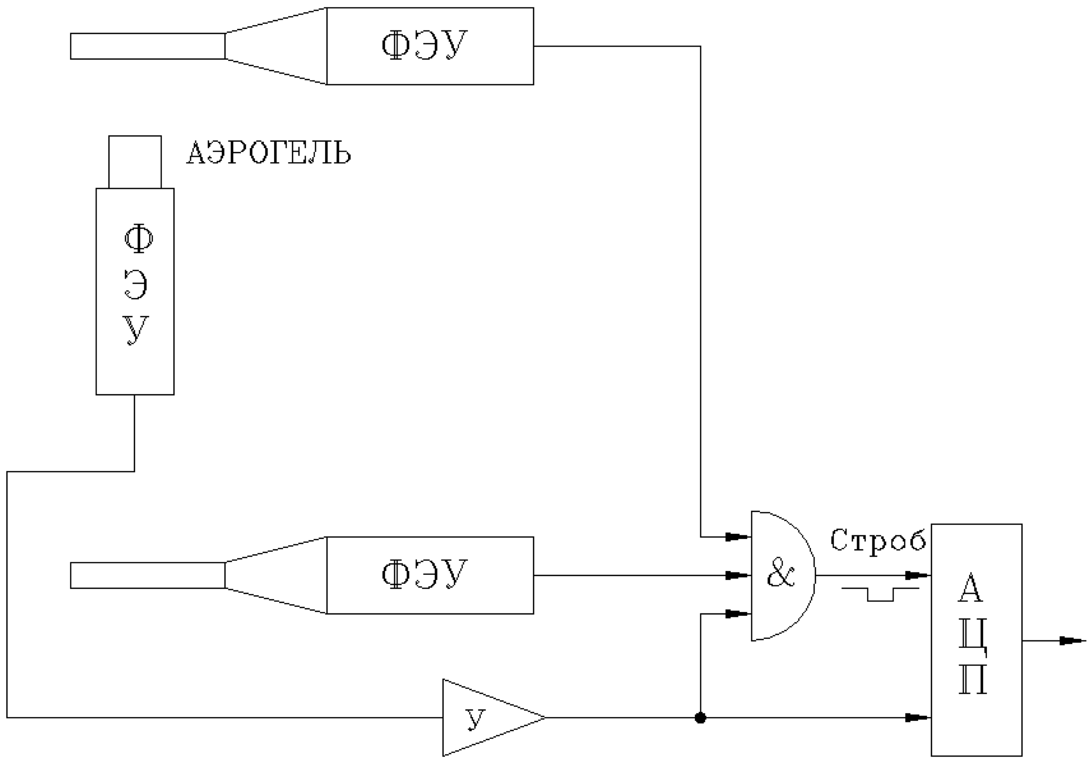

Рис. 5. Схема измерения световыхода аэрогелей под действием космических частиц.

В данных измерениях существенный фон представляло ИВЧ, образующееся в стекле входного окна ФЭУ при прохождении через него космических частиц. Величина этого фона измерялась отдельно, когда исследуемый образец удалялся из счетчика. На рис.6 представлен спектр амплитуд сигналов от ФЭУ в случае облучения образца N2. Там же показан один из спектров сигналов ФЭУ, полученный при калибровке спектрометрического тракта с помощью светодиода. Из-за некоторой неэффективности триггера в спектре присутствует фон случайных совпадений, вызванный шумами ФЭУ. В предположении, что этот фон имеет вид затухающей экспоненты, суммарный спектр всех исследуемых образцов, был профитирован суммой фона и распределения Гаусса (спектры просуммированы с целью увеличения статистики). Результат фитирования показан на рис.7.

На рис.8 представлены измеренные амплитудные спектры сигналов от ФЭУ после вычитания пьедестала, а также результаты вычитания фона случайных совпадений. Стрелками на рисунках обозначены центры тяжести полученных распределений и указаны соответствующие им числа регистрируемых фотоэлектронов.

С целью получения дополнительной оценки вклада сцинтилляции в полную величину сигнала от допированых аэрогелей, измерения были также проведены в геометрии, когда счетчик был повернут в противоположную сторону относительно направления космических частиц. Результаты измерений показаны на рис.9 вместе со спектрами, полученными после вычитания фона случайных совпадений.

Средние значения количества регистрируемых ФЭУ фотоэлектронов от исследуемых образцов после вычитания вклада ИВЧ в стекле ФЭУ приведены в таблице.

Таблица. Средние числа зарегистрированных фотоэлектронов от излучения исследованных образцов.

Расположение образца относительно ФЭУ	образец "N2"	образец "N1"	Чистый аэрогель
Вверху	4,5±0,5	2,7±0,5	2,4±0,4
Внизу	3,4±0,6	1,4±0,6	-0,1±0,5

Сравнивая полученные значения средних чисел регистрируемых фотоэлектронов, можно сделать вывод, что допирование аэрогеля POPOP приводит к увеличению суммарного световыхода для образца N2 почти в 2 раза, а образца N1 приблизительно на 35%.

Рис. 6.
ми;
диода.

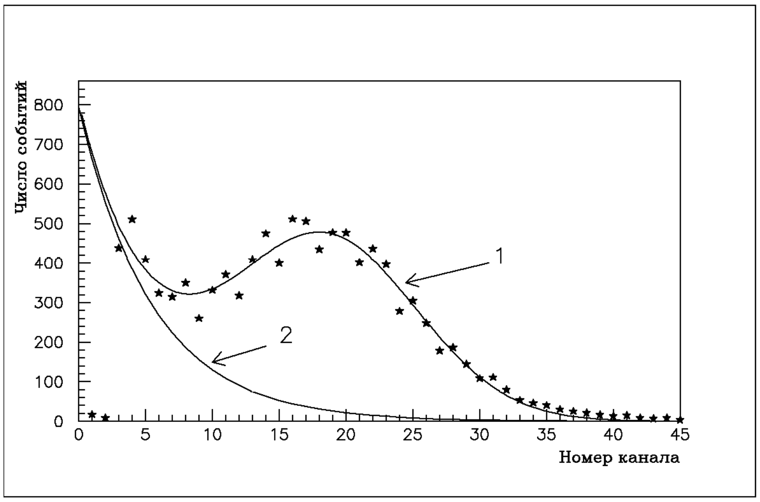

Рис. 7. Результаты фитирования суммарного амплитудного спектра сигналов от всех исследуемых образцов аэрогеля (звездочки) суммой затухающей экспоненты и функции Гаусса (кривая 1). Кривая 2 - аппроксимация фона случайных совпадений.

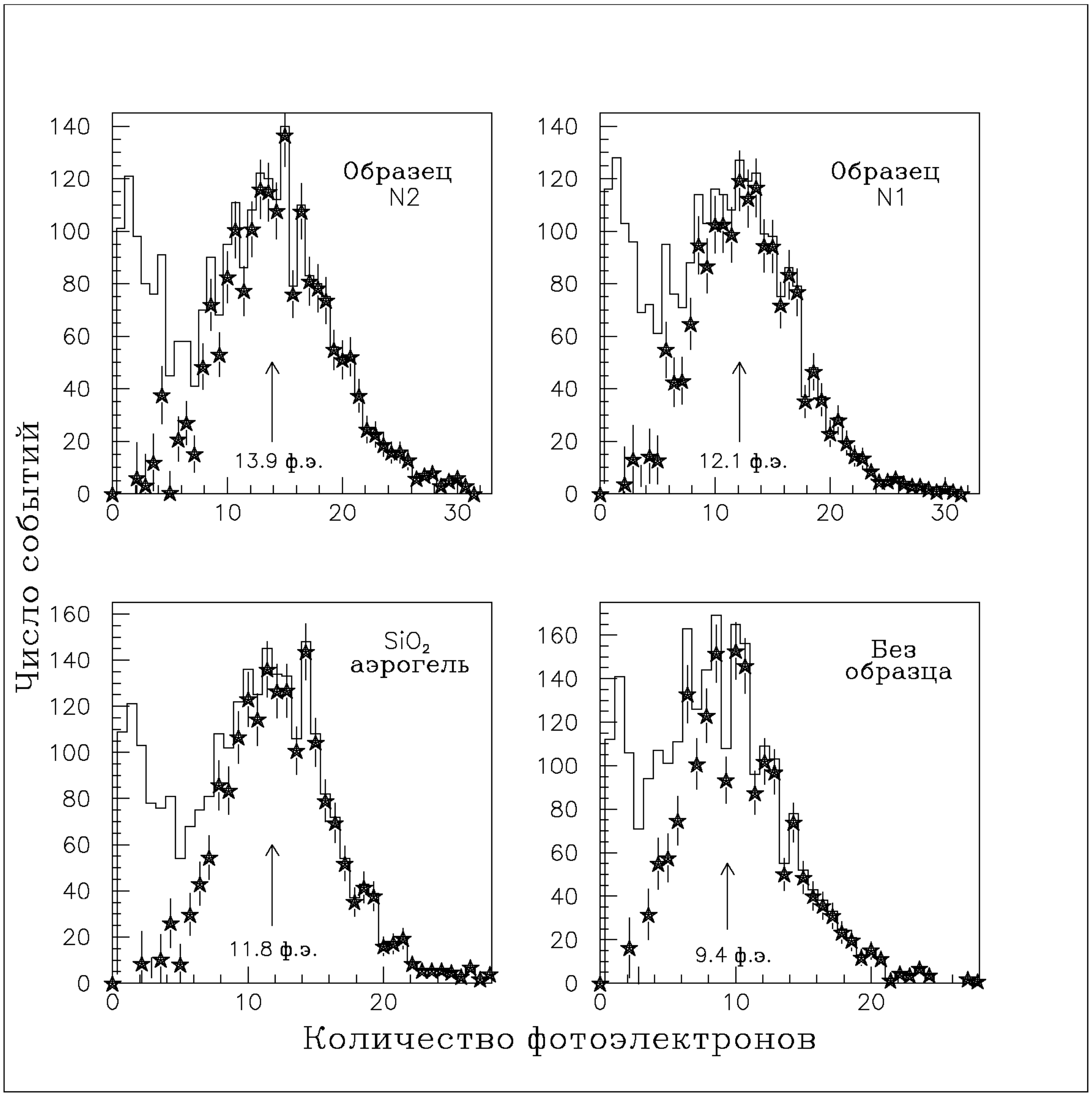

Рис. 8. Амплитудные спектры сигналов, наблюдаемых при облучении образцов космическими частицами при расположении образцов над ФЭУ. Сплошная линия - необработанные данные, звездочки - результат вычитания фона случайных совпадений.

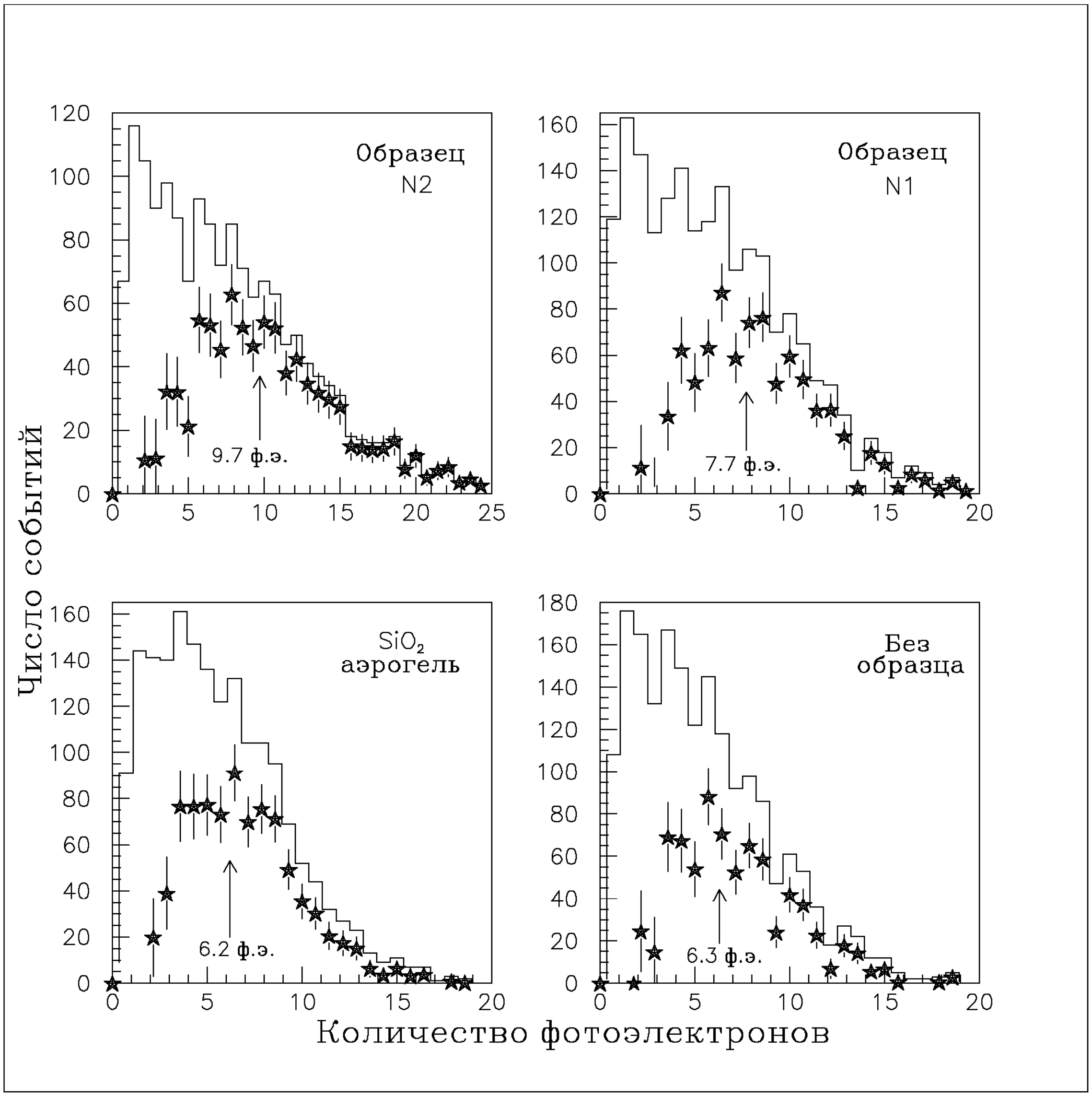

Рис. 9. Амплитудные спектры сигналов, наблюдаемых при облучении образцов космическими частицами при расположении образцов под ФЭУ. Сплошная линия - необработанные данные, звездочки - результат вычитания фона случайных совпадений.

Предполагая, что ионизационные потери энергии космических частиц в аэрогеле (1,83 МэВ см^2/г/10/) близки к ионизационным потерям β-частиц, из полученных данных можно оценить отношение $\frac{\alpha}{\beta}$ для допированых аэрогелей. В одних и тех же условиях при облучении образцов N1 и N2 α-частицами было зарегистрировано 4,8$\pm$0,3 и 1,3$\pm$0,2 ф.э./Мэв, а при облучении космическими частицами 1,3$\pm$0,5 и 4,7$\pm$0,5 ф.э./МэВ, соответственно. Столь существенная разница в отношении $\frac{\alpha}{\beta}$ для образцов N1 и N2 связана с двумя обстоятельствами. В случае образца N1 из-за неравномерного проникновения POPOP в его объем (облучение ультрафиолетовым светом показало, что для этого образца сместитель спектра сосредоточен главным образом в поверхностном слое толщиной 2 мм), вычисленный световыход на 1 МэВ энергии, потерянной минимально ионизирующей частицей, необходимо увеличить приблизительно в отношении толщины всего образца аэрогеля к толщине имплантированной сместителем спектра $\frac{20}{4\div5}$. В этом случае отношение $\frac{\alpha}{\beta}$ для образца N1 будет близко к 1. Значительное ослабление излучения, вызванного α-частицами, в образце N2 на пути к ФЭУ из-за поглощения и рассеяния в веществе самого аэрогеля приводит к заниженному измеренному значению световыхода для этого образца. Однако если предположить, что количество испущенного света при облучении образца N2 α-частицами по крайней мере не меньше, чем для образца N1, отношение $\frac{\alpha}{\beta}$ для второго образца также будет близко к 1.

6. Заключение

Исследованы сцинтилляционные свойства двух допированых POPOP образцов аэрогеля. Весовая концентрация сместителя спектра в образцах задавалась временем их выдержки в атмосфере POPOP и составляла приблизительно 0,7% и 2,5%.

Исследование кинетики излучения допированых аэрогелей методом счета отдельных фотонов при облучении образцов β-частицами от источника Ru^{106} показало, что 58$\pm$9% от полной интенсивности вспышки высвечивается с постоянной времени $\overline{\tau}$ = 1.40$\pm$0.06 нс. Наблюдается также медленная компонента с характерным временем $\overline{\tau} = 5.2\pm0.4$ нс (42$\pm$6%).

Измеренный световыход под действием α-частиц образца с меньшим содержанием POPOP составляет приблизительно 30% от световыхода органического сцинтиллятора (полистирол, 2% паратерфенила и 0,2% POPOP) а образца, с большим содержанием POPOP, 8%. Наблюдающаяся разница в величине световыхода связана с рассеянием и поглощением излучения в аэрогеле на пути к ФЭУ.

В случае облучения космическими частицами световыход допированых образцов превосходит световыход образца чистого аэрогеля на 35% для аэрогеля с меньшим содержанием POPOP и на 100% для аэрогеля с большим содержанием сместителя спектра.

Полученные данные указывают, что отношение $\frac{\alpha}{\beta}$, характеризующее зависимость световыхода от энергии и сорта частиц, для обоих допированых образцов близко к 1.

Проведенные исследования показали, что допирование аэрогеля сместителем спектра делает практически невозможным использование его в качестве материала радиаторов черенковских счетчиков из-за значительного фона люминисцентного излучения. Однако сцинтилляционные характеристики полученных образцов позволяют заключить, что возможно на практике приготовление быстрых сцинтилляторов с промежуточной плотностью между газом и жидкостью на базе SiO_2-аэрогелей. Этот сцинтиллятор может найти применение при использовании его в качестве активного вещества детекторов в опытах, где важна пропорциональность между величиной ионизационных потерь и количеством регистрируемого света, а также где критичным является количество вещества на пути регистрируемых частиц, например в экспериментах с тяжелыми ионами и частицами низких энергий.

Авторы выражают благодарность Воробьеву А.И., дискуссии с которым инициировали начало этой работы, а также Акимову Ю.К. и Зрелову В.П. за обсуждения и проявленный интерес к работе. Мы также благодарны Аппелю П.Ю. за помощь при проведения измерений на спектрофотометре и Гальпериной Р.С. за предоставление различных сцинтиллирующих добавок.

Литература

1. Cantin M. et all. Nucl. Inst. and Meth., v.118, p.177, 1974.
2. Kuschnerus, Diploma Thesis, PI Bonn, 1976.
3. Rasmussen I.L. Revue de Physique Appliquee, Coll. C4, Suppl. n4, Tome 24, avril 1989, p.C4-221.
4. Holl I., Lorenz E., Mageras G., 5th Int. Conf. Instr. for Colliding Beams Physics, Novosibirsk, 1990, ed. Evgeny P.Solodov (Wold Scientific, 1990, p.184.
5. Onuchin A. et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., A 315, 1992, p.517.
6. Файнор В. и др., Способ приготовления сцинтиллятора на базе SiO_2-аэрогеля допированого дифенилоксозолбензолом. Заявка на изобретение №PV 22 83-92, Чехословакия, 1992. "Твердотельный сцинтиллятор". Заявка на изобретение ВНИИГПЭ № 506083/25, Россия, 1992 г.
7. Ambrosio C. et al. CERN-PRE-90-96, 1990
8. Bolinger L., Thomas G., Rev. Sc. Inst., 1961, v.32, №9, p.1044.
9. Hawkes C.M. et al., CALT-68-1598, 1989.
10. Review of Particle Properties, Phys. Rev. D45, N11, p.III.5.