

Пути повышения сроков службы полупроводниковых фотопреобразователей солнечных батарей космических аппаратов.

Т.К.Павлушкина¹, В.В.Цетлин²

1.ОАО Институт стекла, 2.ГНЦ РФ Институт медико- биологических проблем РАН

Введение. Защитные стеклянные покрытия, поглощающие значительную часть космического ионизирующего излучения, широко используются для обеспечения необходимой радиационной стойкости фотопреобразователей солнечных батарей (СБ) и других элементов оборудования космических аппаратов (КА). Высокие требования к оптической прозрачности таких защитных покрытий и жесткие ограничения, накладываемые на их весовые характеристики, определяют необходимость поиска путей повышения радиационно-защитных параметров покрытий при сохранении или, по возможности, уменьшении их толщины [1, 2].

Для повышения эффективности радиационной защиты элементов КА –снижения воздействия ионизирующего излучения были предложены методы, основанные на использовании для торможения и отклонения электронов [3-5] слоев диэлектрических материалов, обладающих свойством образовывать при облучении ионизирующим излучением сильные внутренние электрические поля объемного заряда. Торможение электронов электрическим полем будет дополнительно снижать мощность и полную величину поглощенной дозы за таким диэлектрическим слоем по сравнению с незаряженным диэлектриком. Объемный заряд в диэлектрическом покрытии может создаваться путем предварительного облучения электронами на ускорителе или накапливаться во время полета в радиационных поясах Земли.

Очевидно, что для реализации указанного принципа радиационной защиты необходимы диэлектрические материалы, способные накапливать большой объемный заряд и сохранять его в течение длительного времени в условиях открытого космоса. Жесткость условий при эксплуатации солнечных батарей, заключающаяся в постоянном воздействии на них солнечного вакуумного ультрафиолета, интенсивных потоков короткопробежных электронов и протонов, вакуумного кислорода обусловило бесперспективность использования полимерных и многих неорганических стеклообразных диэлектрических материалов для создания защитных покрытий солнечных батарей. Кроме того в условиях открытого Космоса тепловой режим настолько жесткий, что при выборе материалов для защитных покрытий предпочтение отдано неорганическим стеклам.

Для реализации идеи повышения эффективности радиационной защиты путем создания объемного заряда в защитных стеклянных покрытиях были разработаны материалы, обладающие свойством образовывать при облучении электронами и затем сохранять в условиях космического полета в течение длительного времени сильные внутренние электрические поля.

1.Описание химического состава синтезированных стекол. Требования к стеклам

Для синтеза защитных покрытий были выбраны неорганические стекла, содержащие в качестве стеклообразующих оксиды кремния, фосфора и бора. При этом исходили, что центры захвата избыточного объемного заряда в таких стеклах по-видимому, должны быть обусловлены свойствами поливалентных элементов - фосфором и бором, а не модификаторами. Последние определяют процессы электропроводности, поляризации и диффузии носителей заряда.

Экспериментальные исследования на ускорителях и в натуральных условиях на борту КА проводились с образцами бесщелочных фосфатных стекол с высоким содержанием P_2O_5 (51-70 мол.%) при концентрации B_2O_3 от 9 до 13 мол.% и Al_2O_3 — от 6 до 10 мол.%. Кроме того, в широких пределах варьировалось содержание La_2O_3 (от 0,5 до 14 мол.%) и в разных количествах (от 1 до 25 мол.%) добавлялись оксиды щелочноземельных элементов (MgO , CaO , SrO , BaO). В работах [7,9] были эмпирически установлены составы алюмофосфатных стекол, оптимальные с точки зрения величины и устойчивости внутренних электрических полей, связанных с накоплением объемного электрического заряда. Однако до сих пор неизвестна микроскопическая природа возникновения и накопления объемного заряда в стеклах так же, как и роль отдельных компонентов стекла в эффективности накопления заряда.

При исследованиях на ускорителях и в космических экспериментах использовались образцы стекол в форме дисков диаметром 40 мм и толщиной 0,3- 5,0 мм. Исследования снижения мощности дозы электронного излучения за заряжающимися диэлектрическими стеклами в процессе образования объемного электрического заряда при облучении на ускорителе проводилось в диапазоне энергий электронов 0,7 - 3 МэВ. Плотность тока пучка могла регулироваться в пределах 0,001-0,1мкА/см² и непрерывно контролировалась в процессе облучения каждого образца.

В работах [10,11] было показано, что центрами накопления электронов в фосфатных стеклах могут служить ион- радикалы PO_3^{2-} , хорошо изученные ранее с помощью электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Эти центры образуются в фосфатных стеклах при облучении различными ионизирующими излучениями и являются центрами электронного типа. Поэтому в настоящей работе были изучены спектры ЭПР в облученных на ускорителе электронами (энергия $E = 1$ МэВ, плотность тока 0,01мкА/см², время экспозиции 10 мин) стеклах, составы которых приведены в табл. 2.10.3.

Таблица 1. Условные марки и составы исследовавшихся стекол

Стекло	Молярное содержание, %					
	P_2O_5	La_2O_3	B_2O_3	Al_2O_3	MgO	CaO
Ц-22	51,2	9,2	8,9	6,1	24,4	-
Ц-23	54,80	9,9	9,5	6,5	-	19,0
Ц-24	60,0	10,9	10,4	7,2	-	-
Ц-13	50,0	-	5,0	-	45,0	-
851	50,0	-	-	5,0	45,0	-
858	75,0	-	-	25,0	-	-
17	70,0	-	-	30,0	-	-
20	50,0	-	-	-	-	-
23	50,0	-	-	-	50,0	-
551	64,8	1,1	10,1	9,25	14,7	-
27	60,0	-	3,0	10,0	12,0	10,0
28	75,0	25,0	-	-	-	-

Таким образом, были изучены стекла со следующими особенностями состава:

- многокомпонентные стекла Ц-22, Ц-23 и Ц-24 одного и того же базового состава (в вес.%), в которых проводилось эквивесовое замещение 8 вес.% МО (где М – щелочноземельный элемент) в направлении $Mg \rightarrow Ca \rightarrow Sr$;

- многокомпонентные стекла Ц-13 и 551 с повышенным содержанием P_2O_5 ;
- стекла метафосфатного состава (№23 и №27) P_2O_5-MO , где $M=Mg, Ba$;
- стекла метафосфатного состава $50 P_2O_5-45 MgO-5 Al_2O_3 (B_2O_3)$;
- бинарные алюмофосфатные стекла №№ 17, 20;
- бинарное лантанфосфатное стекло № 28.

2. Лабораторные исследования радиационно-защитных свойств заряженных стекол

На ускорителе электронов были проведены исследования снижения мощности дозы за пластиной защитного стекла в процессе образования в них объемного электрического заряда при облучении. Энергия электронов составляла 0,7 - 3 МэВ, плотность тока пучка могла регулироваться в пределах 0,001-0,1 мкА/см². Толщина образцов выбиралась, исходя из решения задачи определения защитных свойств стекол от пучков моноэнергетических электронов, меньшей, сравнимой или превышающей пробег.

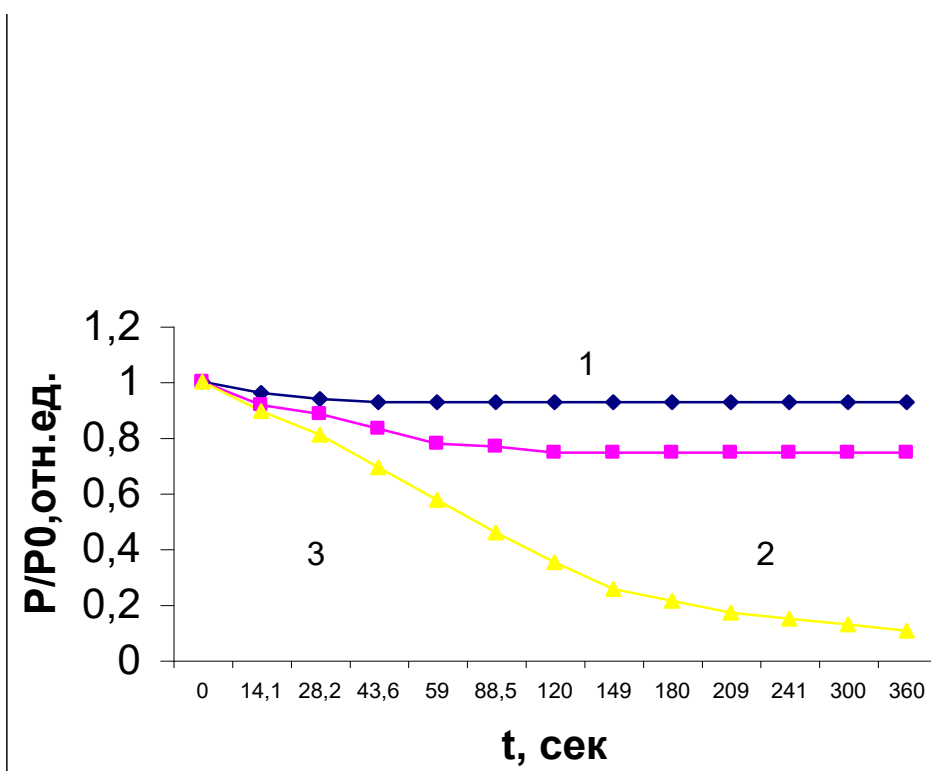


Рис. 1. Зависимость относительной мощности дозы за стеклянными пластинами различной толщины d от времени облучения электронами на ускорителе при начальной энергии $T_0=1,5\text{МэВ}$: 1- $d=0,45R$; 2- $d=0,8R$; 3- $d=1,6R$.

В результате было экспериментально установлено [9], что при образовании в стекле объемного электрического заряда за образцом происходит снижение мощности поглощенной

дозы (см. рис.2.10.5). При толщине образца $d < 0,5R$ снижение мощности дозы не превышает нескольких процентов (кривая 1). При $d=0,8R$ мощности дозы снижается приблизительно на 20 % (кривая 2).

При облучении образцов стекол, толщина которых намного превышает длину пробега R электронов, доза в детекторе расположенном за образцом, создается только тормозным излучением, генерируемым пучком внутри облучаемого стекла. В эксперименте установлен эффект снижения мощности дозы от тормозного излучения за образцом толщиной $d=1,6R$ по мере накопления в нем объемного заряда (кривая 3). При предельно больших значениях напряженности электрического поля в образце для образцов с $d > R$ уменьшение мощности дозы достигает 35 - 45%. В случае взаимодействия электронов с незаряжающимися материалами, например стекла 8- мой серии или проводящими металлическими образцами при $Z=10 - 13$ подобное снижение может быть достигнуто только за счет заметного (в 1,5-2 раза) увеличения толщины.

Измерение защитных свойств стекол производилось спустя 15-20 с после прекращения облучения на ускорителе. Для набора последующих значений флюенса использовались новые образцы стекла. Защитные свойства стекол определялись по уменьшению мощности поглощенной дозы от указанного выше радионуклида за образцом до и после облучения на ускорителе. Измерение мощности дозы производилось при помощи высокочувствительного дозиметра с кремниевым полупроводниковым детектором.

В результате было установлено, что увеличение флюенса заряжающего пучка приводит к постепенному снижению дозы от бета-частиц. При некотором значении флюенса скорость снижения уменьшается, и спад дозы достигает предельного значения, характерного для данной толщины стекла. Максимальное снижение мощности дозы, полученное в эксперименте, составляет 30, 15 и 10%, для образцов соответственно толщиной 0,5 , 1 и 1,5 мм.

Финальная серия экспериментов по испытанию защитных свойств фосфатных стекол была посвящена изучению зависимости выходной мощности кремниевого полупроводникового фотопреобразователя (ФП) от интегрального потока электронов на ускорителе.

В испытаниях были использованы солнечные фотопреобразователи (производство НПО «Квант» г.Москва), на рабочей поверхности полупроводника располагалась пластина стекла толщиной 0,5мм. Стекланные пластины изготавливались из боросиликатного стекла марки К-208 путем вытягивания из расплава и фосфатного стекла условной марки Ц-13, синтезированного в ГИС г.Москва.

Облучение образцов ФП в защитными покрытиями устанавливались на пути пучка электронов перпендикулярно потоку. Предварительно исходная мощность ФП индивидуально измерялась на солнечном имитаторе в отделе оптических покрытий проф.М.М.Колтуна в НПО «КВАНТ».

Плотность тока электронов на поверхности пластины ФП не превышала $0,01 \text{ мкА/см}^2$. Причем ФП были разделены по группам по 10 шт.в каждой. ФП в группе облучались одинаковым интегральным потоком диапазоне от 10^{14} до 2×10^{16} эл./см². В результате было облучено около 100 ФП по 50 в шт. защищенных пластинами из штатного (К208) и опытного (Ц13)стекол.

На рис.3. представлены результаты измерений. Как можно видеть фотопреобразователи, защищенные пластинами из опытного стекла оказались заметно более радиационно стойкими. Причем, если, например, при потоке $\Phi = 10^{15}$ эл./см² остаточная относительная мощность составляет 0,85 от исходной мощности, то остаточная мощность ФП , защищенного штатным стеклом уже становится близкой 0,7.Наиболее разительное отличие по относительной мощности проявляется при потоке $\Phi = 10^{16}$ эл./см² , при котором относительный спад мощности ФП за штатным стеклом настолько велик, что если бы таких

значений достигла мощность солнечных элементов в реальности функционирования в космосе, то они были бы обязательно отключены. В то же время ФП, защищенные покрытиями из опытного (заряжающегося под пучком частиц) еще могло функционировать на орбите. Интегральные потоки, при которых относительная мощность достигает 0,6 различаются в 20 раз. Поскольку интегральный поток частиц в условиях одной и той же орбиты космического аппарата прямо пропорционален времени пребывания КА в космосе, то полученный пример показывает, что срок службы солнечных батарей с защитными покрытиями из заряжающихся стекол, может быть увеличен практически на порядок. Трудно недооценить этот факт.

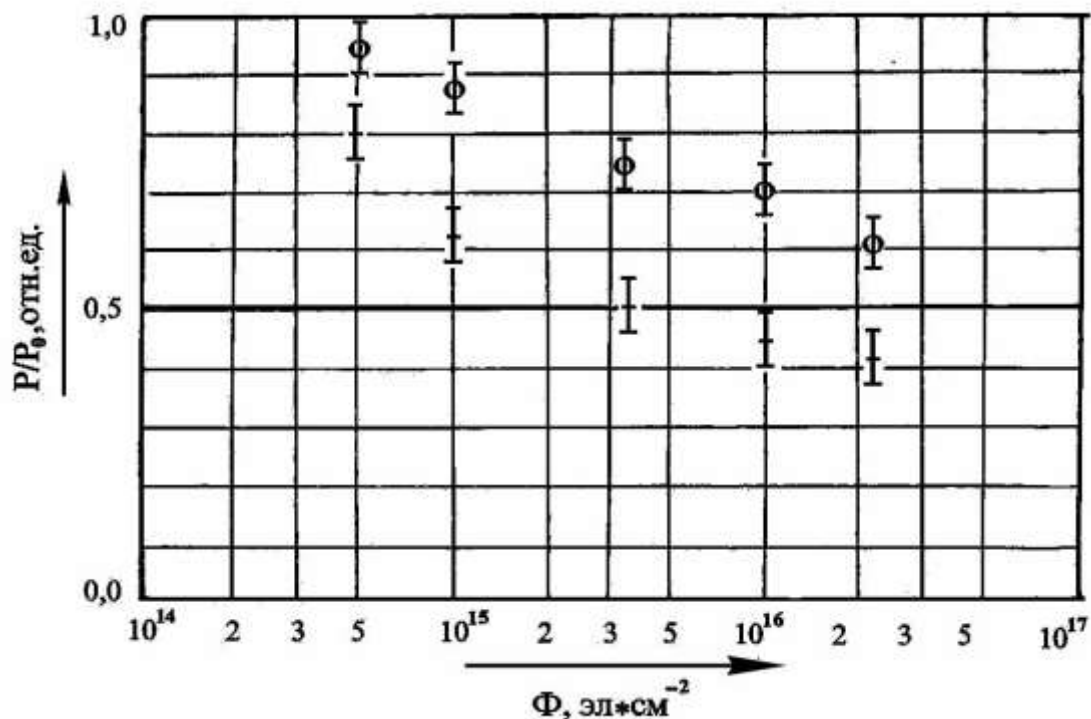


Рис. 3. Относительный спад мощностей фотопреобразователей со штатным (К-208) и опытным фосфатным стеклянным покрытием, вызванный радиационным воздействием пучков электронов с $T_0 = 1\text{МэВ}$ на ускорителе..

3. Испытания радиационно-защитных свойств заряженных диэлектрических слоев в условиях экспонирования на низкоорбитальных КА.

Космические эксперименты

Целью полетных исследований являлось определение способности разработанных заряжающихся стеклообразных материалов сохранять накопленный объемный электрический заряд на открытой поверхности КА и определение радиационно-защитных свойств заряженных образцов по отношению к космическому излучению. Объемный заряд в исследовавшихся образцах стекол создавался при предполетном облучении на электронных ускорителях. Выбор энергии электронов обеспечивал как глубинное, так и приповерхностное залегание заряда.

Испытания устойчивости заряженного состояния и радиационно-оптических свойств покрытий в космическом полете проводились на возвращаемых КА, имевших высоту орбиты ~300 км с наклонениями 62° и 82° , при длительности полета 15-20 дней [6].

Во время проведения полетных экспериментов на ИСЗ «Космос-690, 782 и 936» использовались специальные контейнеры, устанавливаемые на внешнюю поверхность. Каждый контейнер состоял из корпуса и крышки. Образцы материалов размещались в корпусе на специальной плате с ячейками. Во время выведения спутника контейнеры с открытой крышкой находились под теплозащитой обтекателя. Перед спуском на Землю крышки закрывались, предохраняя образцы от перегрева во время спуска.

Условия экспонирования стекол контролировались с помощью пассивных термодатчиков, дозиметров и трековых детекторов. Температура внутренних поверхностей контейнера и образцов стекол во время полета не превышала 60°C . Поглощенная доза в стеклах, обусловленная ионизирующим космическим излучением за время полета ИСЗ, составила 0,14 - 0,62 Гр.

Исследования радиационно-защитного эффекта, обусловленного объемной электризацией стекол, были продолжены на ИСЗ «Космос-2229» с использованием описанной выше методики экспонирования образцов материалов на поверхности спутника [11]. Для испытаний были выбраны образцы неорганических стекол толщиной $d \sim 0,5\text{мм}$ ($0,125\text{ г/см}^2$) и размером $10 \times 20\text{ мм}$. Использовались измерительные сборки, в которых под образцами размещались тонкие термолюминесцентные дозиметры.

Объемный заряд в стеклах создавался облучением электронами на линейном ускорителе за две недели до установки на спутник. Средняя энергия электронов в пучке составляла 0,9 МэВ, а средняя плотность тока - $0,01\text{ мкА/см}^2$. Во время облучения производился контроль тока электронов, падающих на образец, и измерялась мощность дозы за образцом.

В процессе облучения наблюдалось снижение мощности дозы за образцом до устойчивого минимального значения, составлявшего 0,7 от первоначальной мощности дозы 20 рад/с .

Сборки двух типов с заряженным и незаряженным стеклом, снабженные термолюминесцентными дозиметрами, устанавливались попарно на алюминиевой платформе в крышке или на дне одного из 4-х внешних контейнеров. Общее числоборок, экспонировавшихся на ИСЗ «Космос-2229», составляло 12 штук: 6 с заряженными и 6 с незаряженными стеклянными пластинами. Радиационные условия экспонированияборок в контейнере мониторировались с помощью интегральных стеклянных термолюминесцентных дозиметров. В контейнерах также производились измерения температуры.

Полет ИСЗ проходил с 29 декабря 1992 г по 10 января 1993 г. в течение 279 часов. Высоты апогея и перигея орбиты находились соответственно в пределах 398 - 380 км и 227- 223 км, при наклонении орбиты $62 - 82^{\circ}$. Период обращения спутника составлял 90,38 мин.

Послеполетная обработка данных, полученных с термодатчиков, показала, что во время первых восьми дней пребывания спутника на орбите температура в контейнере изменялась от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$, а в последние трое суток была постоянно выше нуля и достигала 60°C .

Измерения с помощью дозиметрическихборок, служивших для исследования глубинного распределения поглощенной дозы космического излучения, показали, что по мере роста толщины вещества поглощенная доза быстро спадала от 32 Гр на поверхности пластин до $0,008\text{ Гр}$ за слоем дозиметров толщиной 4мм (1 г/см^2). Средняя поглощенная доза за необлученными стеклянными пластинами составила $0,7 \pm 0,05\text{ Гр}$, а заряженными - составила в среднем по 6 сборкам $0,52 \pm 0,05\text{ Гр}$.

Результаты исследований на ИСЗ " Космос КОСМОС-2229" представлены в табл. 2.10.7. Видно, что за заряженными на ускорителе стеклянными пластинами действие

электрического поля объемного заряда приводит к дополнительному снижению поглощенной дозы D_3 на 30 - 40% относительно значения D_0 , соответствующего дозе за незаряженными образцами.

Таблица 2. Ослабление поглощенной дозы за заряженными пластинами на орбите ИСЗ «Космос-2229»

№ заряженного образца	1	3	5	7	9	11
Толщина образца, мм	0,52	0,56	0,57	0,50	0,50	0,55
Отношение D_3/D_0	0,7	0,6	0,55	0,75	0,75	0,53

На орбитах упоминавшихся выше спутников серии "Космос" поглощенная доза за слоями вещества толщиной меньше 1 г/см^2 создается преимущественно электронным компонентом космического излучения, в то время как за слоями большей толщины вклад в поглощенную дозу обусловлен протонным излучением. В связи с этим полученные результаты могут служить подтверждением того, что заряженные стекла обладают повышенными радиационно-защитными свойствами по отношению к электронным потокам. Расчетные оценки глубинного распределения дозы от электронного излучения на орбите ИСЗ «Космос-2229» показывают, что при использовании пассивной защиты такое снижение дозы может быть достигнуто при увеличении толщины слоя на 35 - 45%.

Таким образом, в результате объемной радиационной электризации стеклянные слои приобретают дополнительные защитные свойства по отношению к электронному излучению, проявляющиеся не только при облучении на ускорителе, но и в космическом пространстве. Стеклянные пластины, соответствующие по толщине аналогичным защитным покрытиям фотопреобразователей СБ, в заряженном состоянии снижают в 1,5 - 1,8 раза поглощенную дозу от космического излучения на низкой околоземной орбите по сравнению с незаряженными пластинами.

В целом, эксперименты в космосе показали, что, объемный заряд, созданный в результате предварительного электронного облучения, сохраняется в защитных стеклах в условиях воздействия факторов космического пространства, а параметры электрических полей в стеклах вполне соответствуют задаче повышения радиационно-защитных свойств диэлектрических покрытий.

Результаты выполненных исследований позволяют констатировать, что при использовании эффекта объемной электризации диэлектрических покрытий для целей радиационной защиты элементов КА достигается заметный эффект снижения воздействия электронов космического излучения и может быть увеличен ресурс функционирования КА на орбите.

В заключение отметим, что изложенные материалы опубликованы в периодических журналах, а также в качестве раздела в монографии Модель Космоса изданной по инициативе НИИЯФ им.Д.В.Скобельцина МГУ им.М.В.Ломоносова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крейнин Л.Б., Григорьева Г.М. Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации. Исследование космического пространства. Итоги науки. М.: 1979, т.13, 127 с.
2. Raushenbach H.S. Solar Cell Array Design Handbook. The Principles and Technology of Photovoltaic Energy Conversion. Van Nostrand Reinhold Company, N.Y., 1980 , 700 p.
3. Труханов К.А., Морозов Д.Х., Рябова Т.Я. Активная защита космических аппаратов. М: Атомиздат, 1971, 280 с.
4. Truchanov K.A., Morozov D.Kh., Ryabova T.Ya., Sedin G.Z., Tsetlin V.V. Some aspects of active shielding against the radiation in space. Int. Congr. on Protection against Accelerator and Space Radiation. CERN, Geneva, Sci. Rept. CERN, 1971, No 16/1, p. 501-507.
5. Hollis D.L. Bremsstrahlung Shielding from Electron Trapping in Dielectrics. Nucl. Technol., 1971, No 10, p. 325-327.
6. Колтун М.М., Цетлин В.В. Исследование устойчивости заряженного состояния оптических покрытий солнечных элементов в космосе. Гелиотехника, 1985, № 2, с. 43-47.
7. Евдокимов О.Б., Ягушкин Н.И. Взаимодействие электронного пучка с объемным зарядом в диэлектриках. ФТТ, 1974, т. 16, с. 564-565.
8. Цетлин В.В., Мазницына О.А., Шуршаков В.А. О радиационно-защитных свойствах слоев диэлектриков с объемным электрическим зарядом. Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 2, с.150-153.
9. Цетлин В.В., Павлушкина Т.К., Редько В.И. Снижение мощности дозы электронного излучения за слоями заряжающихся диэлектриков. Атомная энергия, 1993, т. 74., вып. 2, с. 163-165.
10. Абдуллин А.А. , Артамонова Г.И., Колтун М.М., Лезихин А.И., Павлушкина Т.К., Редько В.И., Цетлин В.В. Защитные свойства диэлектрических материалов с объемным зарядом. В кн. "Труды 3-ей всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок, Тбилиси, 27-29 октября 1981, Тбилиси, ИПМ им. Веква ТГУ, 1985, т. 111, с. 3-8.
11. Цетлин В.В., Павлушкина Т.К., Редько В.И. Исследование радиационно-защитного эффекта объемной электризации стекол на ИСЗ «Космос-2229». Космические исследования. 1995, т. 33, № 3. с. 286-290.
12. Цетлин В.В. , Павлушкина Т.К., Богомолова Л.Д. Стеклообразные радиоэлектреты - материалы для радиационной защиты космических аппаратов. Стекло и керамика. 2001, №4, с.16-20.