

ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович
(ИКИ РАН),
С.Г. Казанцев (АО «НИИЭМ»),
М.Н. Будяк, М.В. Кожухов, В.Т. Семёнов
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Введение

Большие космические аппараты (КА), массой более 500 кг, и малые космические аппараты (МКА), массой менее 500 кг, предназначены для решения различных задач. Есть задачи, которые можно решить только с помощью больших КА (тяжелых аппаратов). Есть задачи, для решения которых, требуется одновременное измерение множество параметров с помощью комплекса аппаратуры, суммарный вес которой может превышать несколько тонн. Даже в тех случаях, когда требуется от КА выполнение одной операции, но с высокой точностью, например, наблюдение за планетами в других звездных системах, или для регистрации потока первичных частиц ГКЛ в высокоэнергичной части спектра и т.д. Таких задач много и все они могут быть выполнены только с помощью больших КА, вес которых может быть существенно больше тонны.

Но также существует множество задач, которые целесообразно решать с помощью МКА, например, они могут успешно разрабатываться в учебных центрах, т.е. использоваться для подготовки высококвалифицированных кадров для космической индустрии. МКА также могут быть использованы для отработки в космических условиях новых технических решений и выполнения не сложных операций (различного типа наблюдений, в том числе, наблюдений за поверхностью Земли и т.д.). Есть технологии, при которых целесообразно использование только МКА это технологии с использованием роя МКА, каждый из которых внутри роя решает свою задачу и взаимодействует с другими МКА или технологии с применением цепочки спутников для непрерывного контроля определенной области пространства или поверхности Земли.

Мы еще раз подчеркнем, что большие и малые КА между собой не конкурируют, они просто предназначены для решения разных задач.

Все МКА можно условно поделить на миниспутники (массой от 100 до 500 кг), микроспутники (массой от 10 до 100 кг), наноспутники (массой от 1 до 10 кг), пикоспутники (менее 1 кг).

В данной работе мы коротко рассмотрим, как надежность функционирования электронных систем КА зависит от его массы.

Особенности радиационных условий на орбитах солнечно-синхронных и геостационарных КА

Все ионизирующие излучения, действующие на космический аппараты можно разделить на два основных типа. Первый тип это почти изотропное и почти постоянное излучение низкой интенсивности. Второй тип это квазипериодическое излучение высокой интенсивности (импульсное излучение). Например: относительно низкая интенсивность потока частиц галактических космических лучей (ГКЛ) и высокая интенсивность солнечных космических лучей (СКЛ) с периодом около 11 лет; низкая интенсивность потока частиц под радиационными поясами Земли (РПЗ) и высокая интенсивность потока частиц, падающих на поверхность больших и малых КА при пересечении ими области Бразильской магнитной аномалии или области аврорального овала в период высыпания частиц из РПЗ в ионосферу. Орбиты солнечно – синхронных космических аппаратов (Метеор, Канопус и т.д) проходят на высотах меньше 1000 километров. Вез учета магнитных аномалий можно считать, что РПЗ, в области геомагнитного экватора находятся на высоте от 1000 км (нижняя кромка пояса) до 65000 км (верхняя кромка). Основная доля радиации РПЗ сосредоточена в области геомагнитного экватора.

Геомагнитно спокойные периоды, интенсивность потоков частиц РПЗ в экваториальной области магнитосферы в сотни раз больше, чем в высоких широтах.

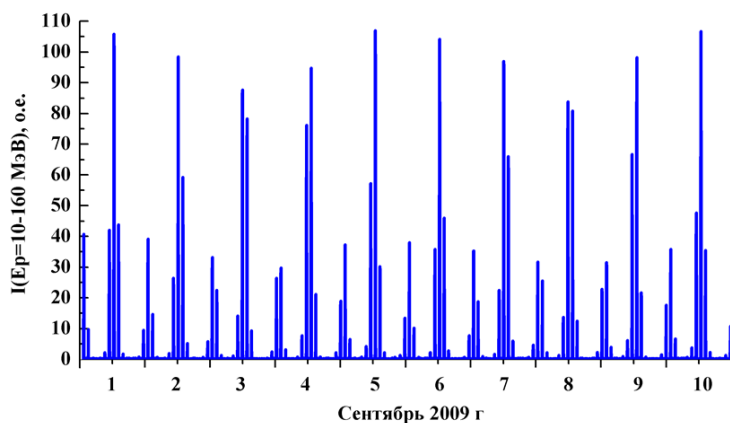


Рис.1. Временной ход интенсивности протонов с энергией от 10 до 160 МэВ (в относительных единицах) на высоте около 835 км по траектории полета КА «Метеор-М» №1.

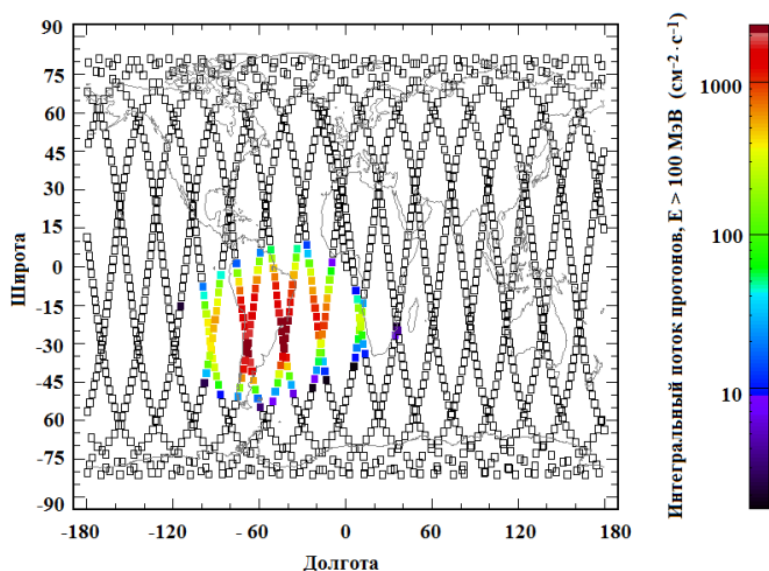


Рис.2. Пространственное распределение интенсивности потоков протонов с энергией более 100 МэВ на высоте 835 км.

Из-за того, что магнитный диполь Земли (соответственно и внутреннее ядро) смещен относительно оси вращения планеты более чем 400 км в сторону Тихого океана, в районе Атлантического океана, вблизи Бразилии, наблюдается существенное ослабление магнитного поля, и соответственно в этой области наблюдается проседание радиационного пояса с высоты 1000 км почти до 200 км. В области Бразильской магнитной аномалии (Южно-Атлантической аномалии) находится разнообразные виды высокоэнергичных частиц (электроны, позитроны, протоны, антипротоны, ядра тяжелых химических элементов и даже скопления ионизированной пыли) интенсивность которых в сотни раз больше, чем на других участках траектории полета «Метеор-М» №1. Пересечение этой области представляет наибольшую радиационную угрозу для больших КА и МКА. В этой области наиболее часто наблюдаются сбои и отказы электронной аппаратуры всех видов КА. На рис.1. показано изменение за первую декаду сентября 2009 г. интенсивности протонов с энергией от 10 до 160 МэВ по данным КА «Метеор-М» №1. Импульсы радиации связаны с пересечением КА области магнитной Бразильской аномалии на высоте около 835 км. Большие КА от МКА отличаются тем, что электронные устройства большого КА за одно и то же время на одной и той же орбите получает поглощенную дозу радиации почти в два раза меньше, чем МКА. Большая масса КА в этом случае играет роль эффективного защитного экрана от радиации. На рис.2 показано распределение

интенсивности высокоэнергичных протонов по орбите КА «Метеор-М» №1. Максимум интенсивности протонов приходится на область Бразильской магнитной аномалии. Солнечно-синхронные большие КА и МКА подвергаются на орбитах импульсному радиационному облучению (см. рис.1 и рис.2).

На рис.3. показано за период с 2007 по 2009 гг. изменение скорости плазмы солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли и потоков релятивистских электронов с энергией $E_e > 0,6$ МэВ на геостационарной орбите (ГСО). Всплески интенсивности потока релятивистских электронов во внешней магнитосфере Земли есть отклик на периодические всплески скорости плазмы солнечного ветра.

Периоды, с которыми повторялись всплески скорости солнечного ветра и интенсивности потока электронов на ГСО, связаны с периодом вращения Солнца вокруг своей оси.

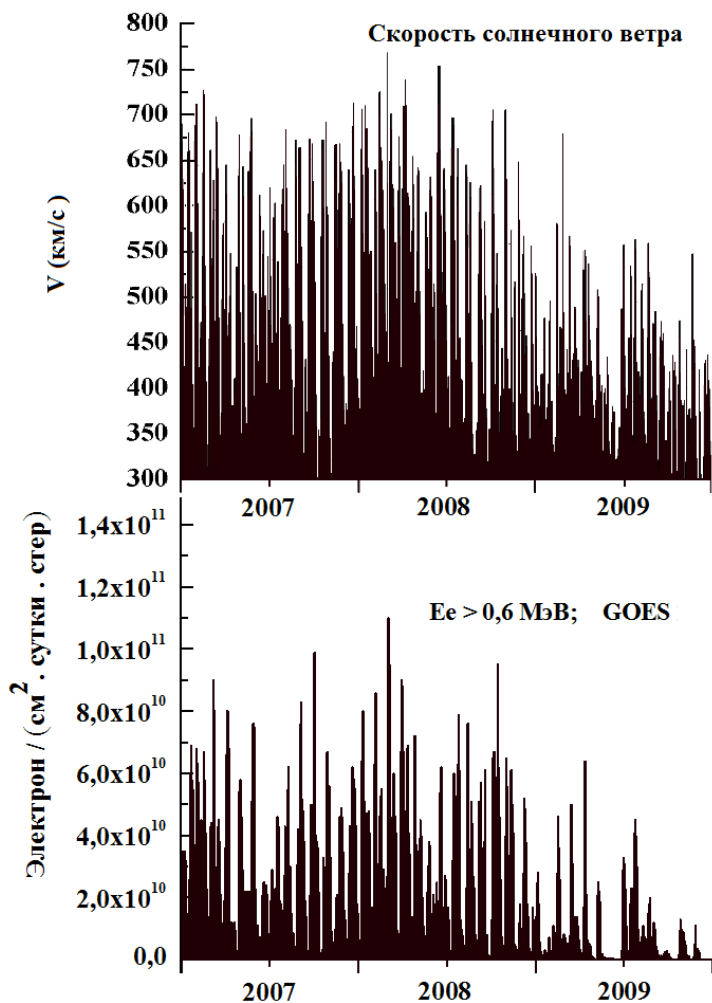


Рис.3. Временной ход скорости плазмы солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли и интенсивности потока релятивистских электронов во внешнем РПЗ в период с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2009 г.

Рассмотрим причину этого явления. Солнце газовый шар и разные его части вращаются с разной скоростью. Вещество Солнца на экваторе делает полный оборот вокруг оси за 25 суток, на средних широтах за 26 суток, вблизи полюсов за 35 суток. (см. рис. 4). Источником высокоскоростного рекуррентного (повторяющегося) потока солнечной плазмы является корональная дыра. Период повторяемости появления вблизи магнитосферы Земли быстрых струй потоков солнечной плазмы зависит от гелиошироты корональной дыры на Солнце, которая является источником этих струй.

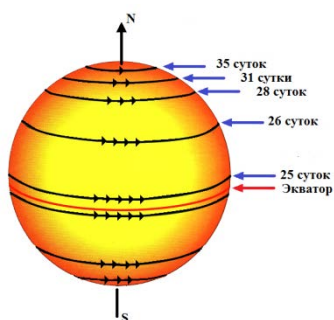


Рис.4. Рисунок иллюстрирует дифференциальное вращение Солнца, на разных широтах вещество Солнца вращается с разной угловой скоростью.

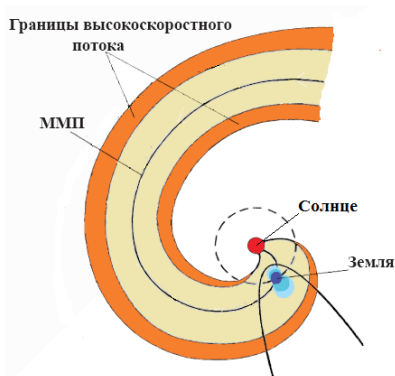


Рис.5. Схематично показано погружение магнитосферы Земли в струю рекуррентного (повторяющегося с периодом вращения Солнца) высокоскоростного потока солнечной плазмы.

На рис. 5 схематично показано, что когда источник высокоскоростного потока солнечной плазмы (в нашем случае корональная дыра) появляется на западной части диск Солнца, происходит взаимодействие магнитосферы Земли с этим потоком. При этом взаимодействии происходит деформация магнитосферы, что сопровождается появлением индукционных электрических полей, приводящих к ускорению частиц РПЗ. Причина существования импульсов радиации во внешнем РПЗ обусловлена зависимостью потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ от скорости плазмы солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли [1-3]. При столкновении потока плазмы солнечного ветра с магнитосферой Земли, часть кинетической энергии ветра, посредством цепочки различных физических процессов, трансформируется в кинетическую энергию частиц РПЗ. При увеличении скорости солнечного ветра процессы ускорения частиц становятся более эффективными. Физических процессов, приводящих к ускорению заряженных частиц много, например, ускорение в индукционных электрических полях, ускорение на границе магнитосферы в сдвиговых течениях плазмы (механизм Бережко [4, 5]) и т.д. Наиболее эффективное возрастание потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ наблюдается при взаимодействии магнитосферы Земли с рекуррентными высокоскоростными потоками солнечного ветра, в которых V_z – компонента межпланетного магнитного поля имеет отрицательное значение.

На рис.6 приведены спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра вблизи магнитосферы Земли и интенсивности потока релятивистских электронов на ГСО. В 2007 г. не было мощных солнечных вспышек и практически все значительные возрастания скорости солнечного ветра были струями плазмы из корональной дыр, которая в этот период находилась на средних широтах. Существенные изменения скорости солнечного ветра и интенсивности релятивистских электронов на ГСО наблюдались с периодом около 26 суток. Меньшие периоды (14 и 9 суток) относительно не большие возрастания скорости солнечного ветра, вероятно, связаны с секторными структурами.

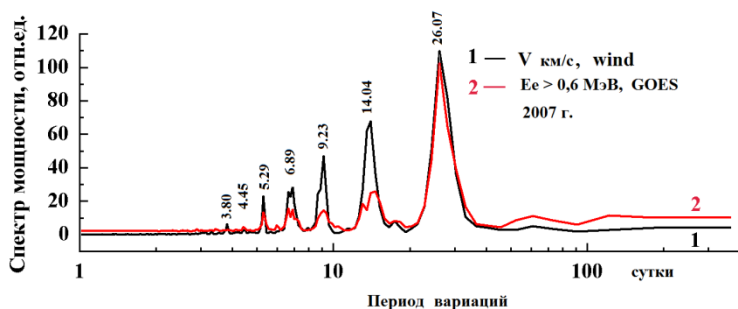


Рис.6. Спектры мощности флуктуаций (в относительных единицах) скорости плазмы солнечного ветра и интенсивности потока релятивистских электронов внешнего РПЗ за период с 1 января по 31 декабря 2007 г.

Состояние межпланетной среды и динамика потоков релятивистских электронов во внешнем РПЗ для периода относящегося к концу 24 цикла солнечной активности (2007 – 2008 гг) и начало 25 цикла (2009 г.) подробно рассмотрены в работах [6 - 9].

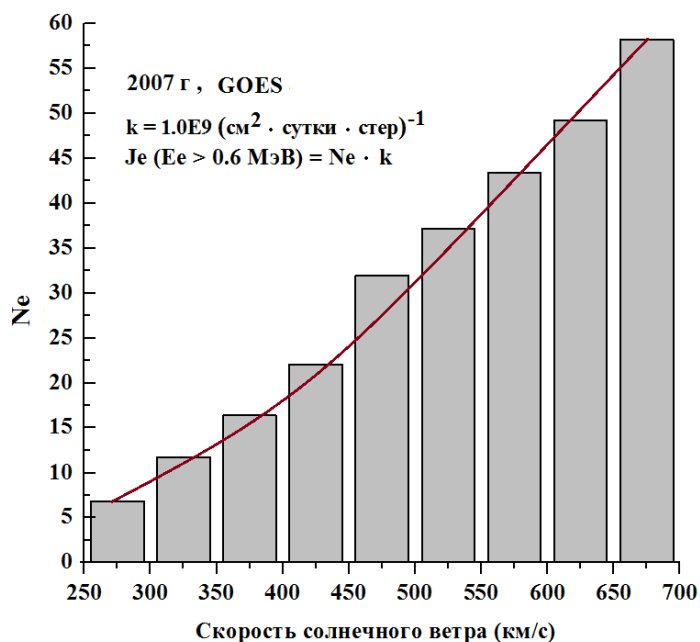


Рис.7. Интенсивность потока релятивистских электронов внешнего РПЗ спустя двое суток после регистрации вблизи магнитосферы Земли скорости солнечного ветра.

При возрастании скорости солнечного ветра во внешней магнитосфере наблюдается увеличение интенсивности потока релятивистских электронов, максимум потока которых, обычно, запаздывает относительно максимума скорости солнечного ветра на несколько суток. На рис.7. приведена зависимость интенсивности потока электронов с энергией $E_e > 0.6$ МэВ (с учетом задержки 2-е суток) от величины скорости плазмы солнечного ветра.

Кроме частиц РПЗ, большие КА и МКА подвергаются воздействию частиц солнечных космических лучей (СКЛ), энергия которых может достигать десятки ГэВ и галактических космических лучей (ГКЛ), энергия которых может достигать сотни миллиардов ГэВ. Частицы СКЛ и ГКЛ способны вызвать сбои и отказы в работе электронной аппаратуры КА. Частицы СКЛ действуют на аппаратуру больших КА и МКА одинаково. Высокоэнергичные частицы ГКЛ действуют на аппаратуру больших КА и МКА по разному. Причина этого различия состоит в том, что для развития мощного ливня вторичных частиц в конструкции КА требуется большое количества вещества, в МКА его может быть не достаточно. По этой причине высокоэнергичные частицы ГКЛ могут быть менее опасны для МКА. Эти выводы можно сделать исходя из результатов наблюдения за широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) вторичных частиц (см. рис.8). Крупнейшая установка в Россия (площадью 24 км кв.) для регистрации ШАЛ расположена в Якутии вблизи деревни Октемцы. Любая частица ГКЛ (фотон, нейтрон, протон, электрон) имея большую энергию, столкнувшись с частицей атмосферы Земли, теряет значительную часть своей кинетической энергии, которая превращается в элементарные частицы вещества и антивещества. Об этом удивительном свойстве энергии мы писали в работе [7]. Полное количество вторичных частиц в ливне может быть несколько миллионов, а в некоторых случаях и несколько миллиардов. Не все частицы в ливне одинаково опасны для электронной аппаратуры. Самая опасная часть ливня - это жало ливня, которое представляет собой струю релятивистских частиц двигающихся в очень маленьком телесном угле [3]. Такая струя образуется при первом столкновении частицы ГКЛ с частицей конструкции космического аппарата. Наиболее вероятно, столкновение происходит на глубине около 100 грамм/см^2 , максимум частиц в ливне достигается на глубине около 600 грамм/см^2 и больше.

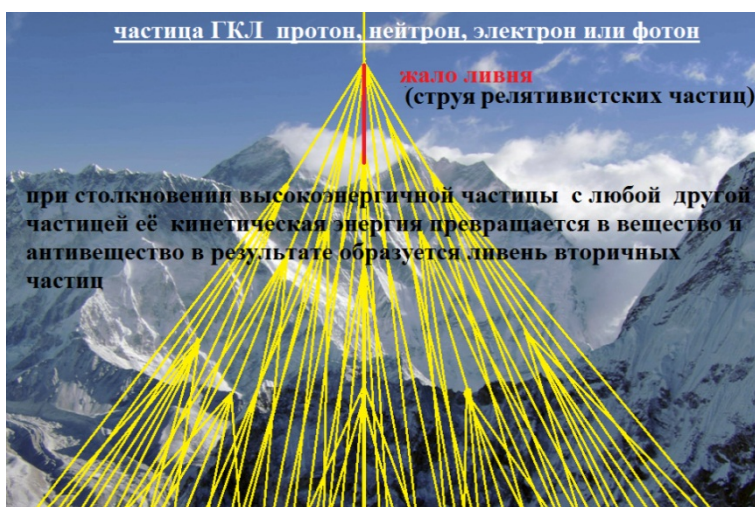


Рис.8. Схема развития широкого атмосферного ливня в атмосфере Земли, вызванного высокоэнергичной частицей ГКЛ (протоном, электроном, нейтроном или фотоном).

ВЫВОДЫ

Большие и малые солнечно-синхронные КА, так же как и КА на ГСО подвергаются импульсному (не равномерному) облучению потоками космической радиации. Электронные компоненты большого КА в основном «собирает» радиацию с телесного угла 2π , малого КА с телесного угла 4π . Защищенность большого КА от частиц РПЗ может быть лучше, чем малых КА. Число сбоев и отказав электронных компонент малых КА от воздействия высокоэнергичных частиц ГКЛ (способных вызвать ливни) ожидается меньше, чем число сбоев и отказов электронных компонент больших КА. Поскольку для развития ливня вторичных частиц требуется большое количество вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безродных И.П., Шафер Ю.Г. / О связи долгопериодических вариаций электронов во внешнем радиационном поясе Земли с параметрами солнечного ветра // Космические исследования. 1982. т.20 вып.4, с. 639-641.
2. Безродных И.П., Шафер Ю.Г. / Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью // Изв.АН. СССР. Сер.физ. 1983. т.47, № 9. С.1684-1686.
3. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.Т. «Радиационные эффекты в космосе». Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве / М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014, - 106 с.
4. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г. Морозова Е.И., Писаренко Н.Ф. / Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. т.48, N 11. с. 2165-2167.
5. Безродных И.П., Бережко Е.Г., Морозова Е.И., Писаренко Н.Ф., Плотников И.Я., Шафер Ю.Г. / Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе. // Геомагнетизм и аэрономия. 1984. т.24. N 5. с.818-820.
6. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Будяк М.Н., Семёнов В.Т. /Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006-2010 г. / Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ». -2015. Том. 145, № 2, с.27-41. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/radiationbelts.aspx> свободный. Прямая ссылка: <http://www.d54x.ru/articles/02/201501.pdf>
7. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Казанцев С.Г., Будяк М.Н., Семёнов В.Т./ Защита космических аппаратов от ионизирующих излучений //тезисы доклада. Материалы конференции "Иосифьяновские чтения 2015", г. Истра. АО "НИИЭМ". 11 ноября 2015. с.41-50. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/radiationbelts.aspx> свободный. Прямая ссылка: <http://www.d54x.ru/articles/02/201502.pdf>
8. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Будяк М.Н., Семенов В.Т. /Энергетические спектры электронов внешнего радиационного пояса земли в период минимума солнечной активности в 2007 г. // одиннадцатая ежегодная конференция "физика плазмы в солнечной системе" 15 - 19 февраля 2016, ИКИ РАН. Секция «магнитосфера», доклад №60. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/radiationbelts.aspx> свободный. Прямая ссылка: <http://www.d54x.ru/articles/02/201601.pdf>
9. Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Будяк М.Н., Кожухов М.В., Мусалитин А.А., Семенов В.Т. /Структура энергетических спектров потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли и динамика поглощенной дозы радиации в период минимума солнечной активности в 2007 г. и 2009 г.// Доклад на четвертой международной конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». г. Москва. АО «Корпорация «ВНИИЭМ» - 2016 г. [Электронный ресурс]. – Статья (формат pdf). - Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/radiationbelts.aspx> свободный. Прямая ссылка: <http://www.d54x.ru/articles/02/201602.pdf>