

## ВАРИАЦИИ ПОТОКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ С ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ СОЛНЦА

И. П. Безродных, М. В. Кожухов,  
А. А. Мусалитин, В. Т. Семёнов

*Рассматриваются периоды на спаде 23-го (2007 г.) и 22-го (1995 г.) циклов солнечной активности для исследования периодических вариаций параметров межпланетной среды и магнитосферы. Эти периоды характерны практически полным отсутствием мощных солнечных вспышек. Почти все вариации параметров межпланетной среды и магнитосферы, включая периодические изменения интенсивности ионизирующих излучений на геостационарной орбите и на солнечно-синхронных орбитах (за счет высыпания электронов в области аврорального овала), определялись рекуррентными высокоскоростными потоками (струями) солнечной плазмы, источниками которых были долгоживущие (несколько оборотов Солнца) корональные дыры. Для этих периодов сделан вывод, что на спаде солнечной активности вблизи минимума вспышечной активности Солнца в спектрах вариаций параметров межпланетной среды, магнитосферных параметров, вариации плотности атмосферы на солнечно-синхронных орбитах, вариации интенсивности потоков ионизирующих излучений на орбитах космических аппаратов в магнитосфере Земли присутствовала частота вращения Солнца. Связь периодичности изменения параметров межпланетной среды и магнитосферы с частотой вращения Солнца может быть использована при разработке методики их прогноза.*

*Ключевые слова:* межпланетная среда, магнитосфера Земли, радиационные пояса Земли, солнечная активность, солнечный ветер, корональные дыры, частота вращения Солнца.

### Введение

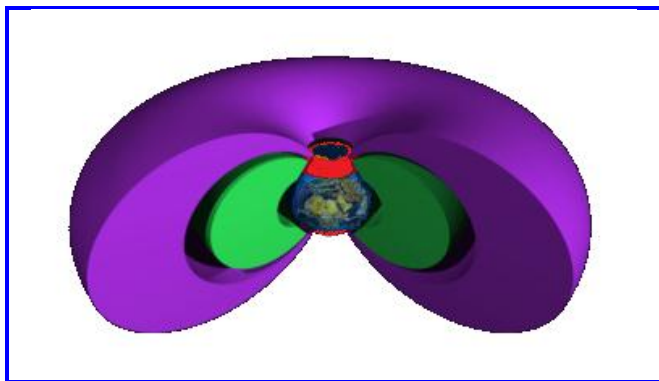
Впервые в СССР экспериментальные исследования потоков высокоэнергичных электронов на геостационарной орбите (ГСО) были выполнены сотрудниками лаборатории космических исследований Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук (ИКФИА СО РАН) И. П. Безродных и Ю.Г. Шафером [1 – 3]. Было установлено, что необходимым условием для возрастания потоков высокоэнергичных электронов в магнитосфере Земли является возрастание скорости солнечного ветра. Эти работы положили начало исследованию вариаций интенсивности потоков релятивистских электронов в магнитосфере Земли и их связи с рекуррентными (повторяющимися с частотой вращения Солнца) высокоскоростными потоками солнечного ветра [4 – 13].

Земля, как и все планеты солнечной системы, находится в короне Солнца. По этой причине совершенно естественно считать, что радиационные условия на орбитах космических аппаратов определяются физическими процессами внутри Солнца и на его поверхности (градиентами магнитных полей в локальных областях Солнца, динамикой диссипации магнитной энергии, глубинными процессами внутри Солнца), вследствие которых образуются корональные дыры на Солнце и связанные с ними высокоскоростные рекуррентные потоки (струи) солнечной плазмы [12].

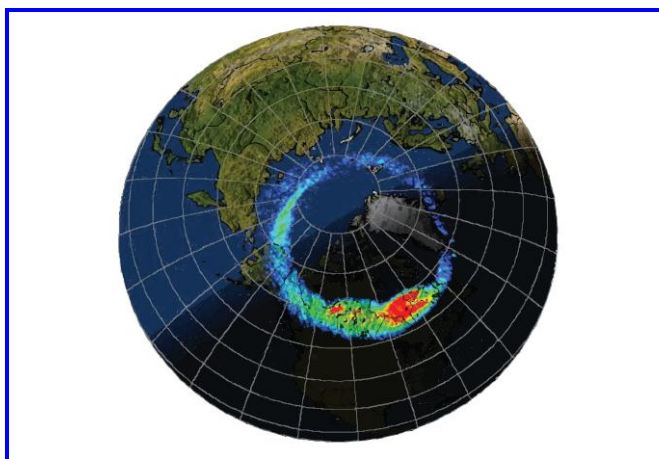
### Вариации интенсивности потоков частиц радиационных поясов Земли

Радиация в околоземном космическом пространстве состоит из нескольких различных ком-

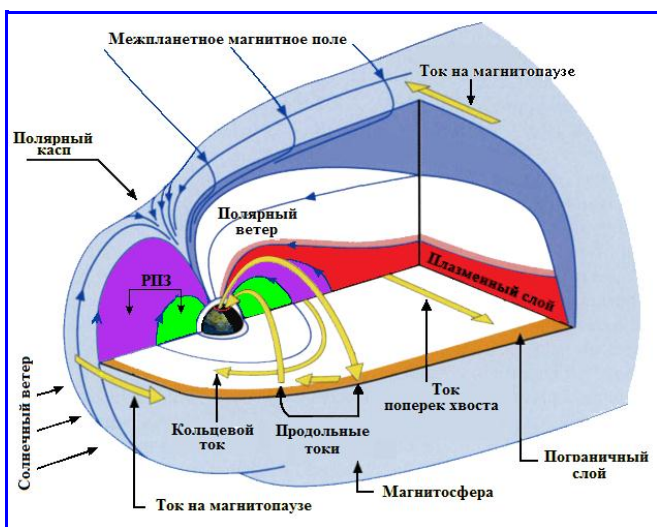
понент, которые отличаются между собой интенсивностью потока, химическим составом и распределением частицы по энергиям. Частицы радиационных поясов Земли (РПЗ) являются одной из компонент ионизирующих излучений, в состав которой входят энергичные электроны, позитроны, протоны, антипротоны и ядра химических элементов, захваченных в геомагнитном поле [12]. При взаимодействии струи высокоскоростного потока солнечной плазмы с магнитосферой Земли наблюдается увеличение геомагнитной активности и увеличение интенсивности потоков высокоэнергичных электронов в магнитосфере Земли. Из-за высокой интенсивности потоков электронов в РПЗ вблизи внешней границы плазмосферы развивается электронно-циклотронная неустойчивость, приводящая к генерации низкочастотных (ОНЧ) электромагнитных волн. Взаимодействие ОНЧ волн с высокоэнергичными электронами РПЗ приводит к их сбросу (высыпанию) в ионосферу Земли. Избыточный поток высокоэнергичных электронов сам создает среду (электромагнитное излучение), которая приводит к их сбросу в ионосферу [12]. Наиболее интенсивное высыпание частиц наблюдается в области северного и южного аврорального овала. На рис. 1 схематично изображены радиационные пояса и авроральный овал, где в период геомагнитных возмущений наблюдаются высыпания релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса. Эти высыпания вызывают свечение верхних слоев атмосферы, мы их видим как полярные сияния.



**Рис. 1. Изображение внутреннего (зеленый цвет), внешнего (лиловый цвет) радиационных поясов Земли и области аврального овала (красный цвет), где наблюдаются наиболее интенсивные и частые высыпания заряженных частиц из радиационных поясов Земли в ионосферу**



**Рис. 2. Ультрафиолетовое свечение полярного овала (космический аппарат Polar, 4.04.1997 05:18:59 UT)**



**Рис. 3. Магнитосфера Земли и ее основные структурные элементы**

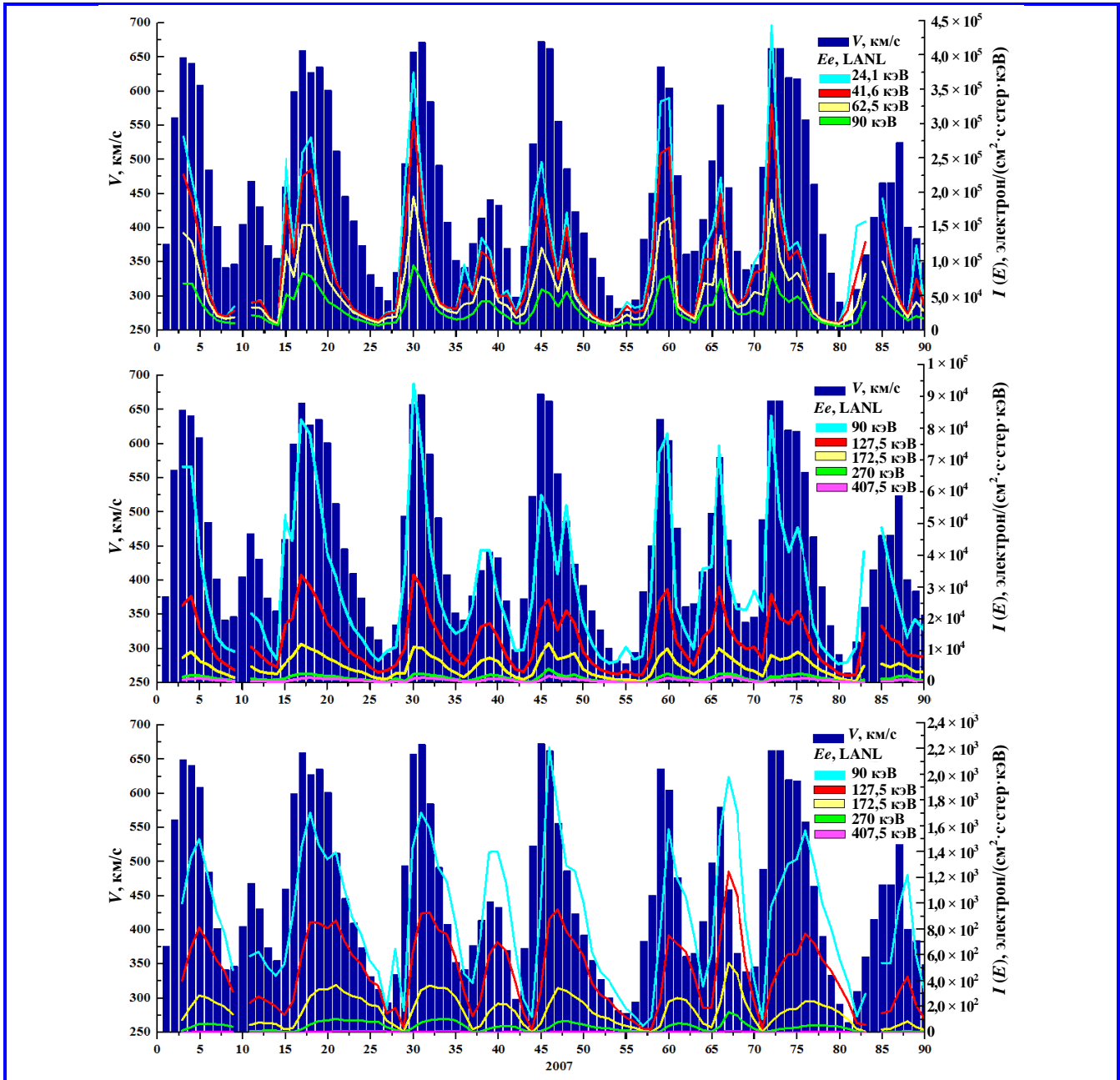
При высыпании электронов из РПЗ в области аврального овала наблюдается увеличение дозовых нагрузок на солнечно-синхронные космические аппараты (КА) (например, серии «Метеор») и торможение КА из-за увеличения плотности атмосферы в области аврального овала.

При геомагнитных возмущениях энергия высыпавшихся частиц, электрических токов и электромагнитного излучения высвобождается в верхней атмосфере, в основном в области аврального овала (рис. 2) (Auroral Particles and Imagery : [сайт]. URL : <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/>). Нагрев верхней атмосферы сопровождается увеличением плотности атмосферы на орбитах, пересекающих авральный (полярный) овал, в частности на солнечно-синхронных орбитах, например, КА серии «Метеор».

Магнитосфера Земли – это кометообразная область, занятая магнитным полем Земли. Внутри магнитосферы Земли располагается магнитная ловушка заряженных частиц РПЗ. Магнитное поле в РПЗ удерживает заряженные частицы в ограниченной области пространства [12]. Уровень радиации в магнитосфере Земли в миллион раз больше, чем за пределами магнитосферы. Магнитосфера защищает планету от сверхзвуковых потоков плазмы солнечного ветра, от потоков солнечных космических лучей и потоков галактических лучей. Заметим, если бы магнитное поле Земли исчезло, то гравитационное поле Земли не способно было бы удерживать атмосферу Земли. Солнечный ветер сдул бы всю атмосферу за очень короткий период. Планета, которая не имеет собственного магнитного поля, не может иметь атмосферу. На рис. 3 схематично показано изображение магнитосферы Земли и радиационных поясов. Изображение внутреннего РПЗ показано зеленым цветом, внешнего – лиловым [12].

Магнитосфера защищает КА от воздействия солнечных и галактических космических лучей, но потоки электронов и протонов, находящихся в магнитной ловушке внутри магнитосферы, представляют для КА большую угрозу.

На рис. 4 для первых 90 дней 2007 г. показана динамика интенсивности потоков электронов в диапазоне энергий 24,1 – 2000 кэВ, 13-ти энергетических каналов, данные спутника серии LANL на ГСО и временная структура скорости солнечного ветра (ссылки на базы данных NASA приведены на сайте Space research laboratory в разделе Space weather data (Space weather data // Space research laboratory [сайт]. – URL: <http://www.d54x.ru/ssilky.aspx>)). На рис. 4 хорошо видна зависимость интенсивности потоков электронов на геостационарной орбите от рекуррентных высокоскоростных потоков плазмы солнечного ветра [10].



**Рис. 4.** Динамика потока электронов на геостационарной орбите для 13-ти энергетических каналов электронов от 24,1 кэВ до 2 МэВ и скорости плазмы солнечного ветра для первых 90 дней 2007 г.

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. 5 приведена зависимость интенсивности потока электронов с энергией  $E_e > 0,6$  МэВ (с учетом задержки 2-е суток) от величины скорости плазмы солнечного ветра [11]. При столкновении потока плазмы солнечного вет-

ра с магнитосферой Земли часть кинетической энергии ветра посредством цепочки различных физических процессов частично 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 ускорения Е.Г. Бережко) 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, а представлена фотография Солнца в рентгеновских лучах, корональная дыра обведена красным. На рис. 6, б, схематично показана струя быстрого солнечного ветра, вытекающая из корональной дыры. Вблизи минимума солнечной активности уровень турбулентности межпланетного магнитного поля (ММП) в высокоскоростном рекуррентном потоке (в струе) солнечного ветра может быть больше, чем в окружающем пространстве. По этой причине струя в межпланетном пространстве может создавать распространению частиц галактических космических лучей (ГКЛ) большее сопротивление, чем окружающая среда.

Интенсивность потока частиц ГКЛ внутри струи будет меньше, чем за ее пределами. На рис. 6 схематично показано, что когда источник струи высокоскоростного потока солнечной плазмы (в нашем случае корональная дыра) появляется на западной части диска Солнца, происходит взаимодействие магнитосферы Земли с этим потоком. При этом взаимодействии происходит деформация магнитосферы, что сопровождается геомагнитным возмущением, появлением индукционных электрических полей, перестройкой ионосферно-магнитосферной токовой системы, ускорением заряженных частиц,

генерацией низкочастотного электромагнитного излучения, выпадением заряженных частиц из РПЗ в ионосферу, разогрев верхней атмосферы, подъем атмосферы на большие высоты. В области аврального овала заметного увеличения плотности атмосферы можно ожидать до высот порядка 1000 км.

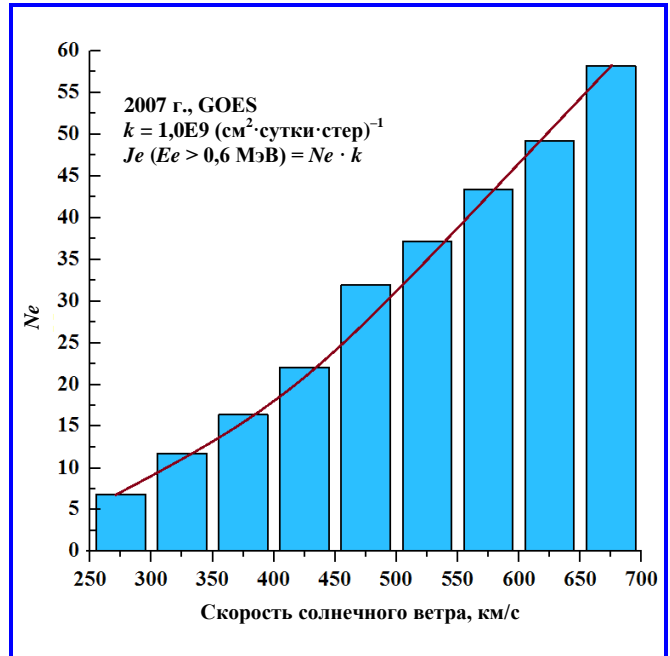


Рис. 5. Распределение интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите в 2007 г. по значениям скорости солнечного ветра. Учитывалась задержка изменения интенсивности потока электронов относительно изменения скорости солнечного ветра в двое суток

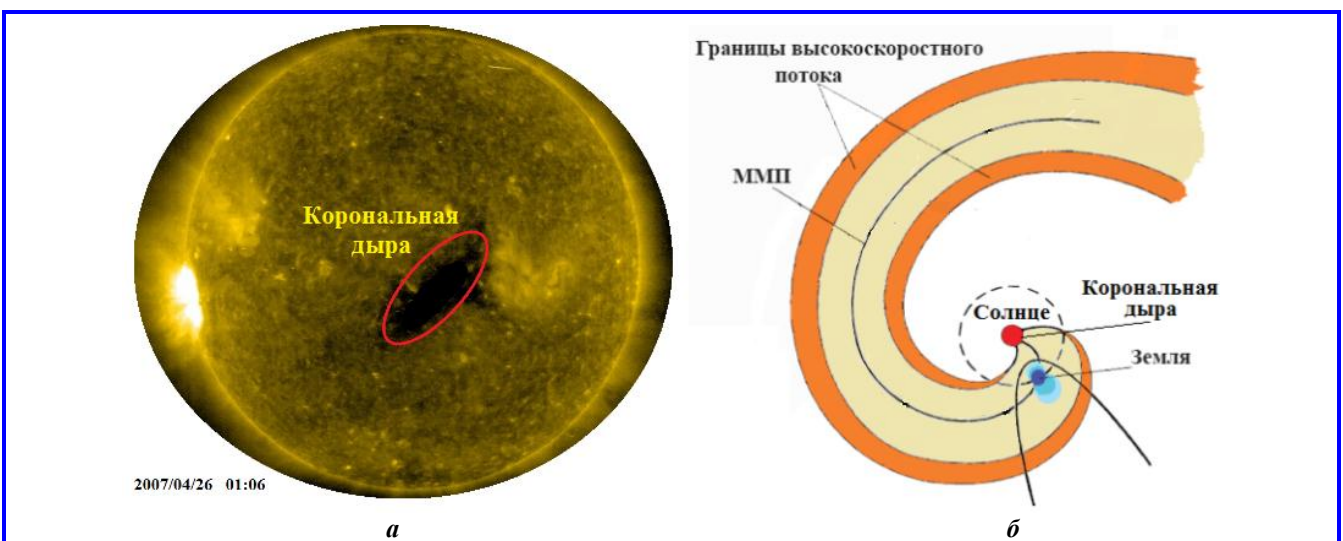


Рис. 6. Схема погружения магнитосферы Земли в струю рекуррентного (повторяющегося с периодом вращения Солнца) высокоскоростного потока солнечной плазмы, источником которого является корональная дыра

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 во внешнем РПЗ, связаны с периодом вращения Солнца вокруг своей оси. 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 (рис. 7). Источником высокоскоростного рекуррентного (повторяющегося) потока солнечной плазмы является корональная дыра. Период повторяемости появления вблизи магнитосферы Земли быстрой струи потоков солнечной плазмы зависит от гелиошироты корональной дыры на Солнце, которая является источником струи плазмы.

На рис. 8 приведены спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра  $V$  вблизи магнитосферы Земли и интенсивности потока релятивистских электронов на ГСО [11]. В 2007 г. не было мощных солнечных вспышек, и практически все значительные возрастания скорости солнечного ветра были струями плазмы из корональной дыры, которая в этот период находилась на средних широтах.

Существенные изменения скорости солнечного ветра и интенсивности релятивистских электронов на ГСО наблюдались с периодом около 26-ти суток. В меньшие периоды (14 и 9 суток) относительно небольшие возрастания скорости солнечного ветра, вероятно, связаны с секторными структурами ММП.

Для исследования периодических изменений параметров межпланетной среды и магнитосферы Земли был выбран период с 1 января до 31 декабря 2007 г. Заметим, что 2007 г. соответствует периоду спада 23-го цикла солнечной активности, когда на фоне угасающей солнечной активности четко проявляются струи высокоскоростных потоков плазмы из корональных дыр. На рис. 9, а приведены данные измерений параметров межпланетной среды, полученные космическим аппаратом АСЕ: скорости солнечного ветра  $V$ ; плотности плазмы; температуры плазмы;  $B_x$ -компоненты ММП. На рис. 9, б представлены спектры мощности флуктуаций этих параметров в относительных единицах. Наибольшая мощность флуктуаций всех параметров наблюдается на частоте вращения Солнца (соответствующий период около 26-ти суток) [13].

На рис. 10, а представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра  $V$ ;

$Kp$ -индекса геомагнитной активности, который характеризует степень возмущенности геомагнитного поля (т. е. степень интенсивности «дрожания» силовых линий поля);  $Dst$ -индекса геомагнитной активности, который характеризует интенсивность электрического тока, протекающего в области магнитного экватора вокруг Земли на расстоянии нескольких земных радиусов от ее поверхности; интегрального потока электронов (с энергией более 0,6 МэВ) на ГСО. На рис. 10, б представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра; дифференциальных потоков электронов с энергией 625 и 925 кэВ; интегрального потока протонов ГКЛ с энергией более 100 МэВ. Из данных, приведенных на рис. 10, следует, что максимальная мощность флуктуаций параметров межпланетной среды и геомагнитосферы, а также мощность флуктуаций интенсивности потока частиц ГКЛ сосредоточена на частоте вращения Солнца [13].

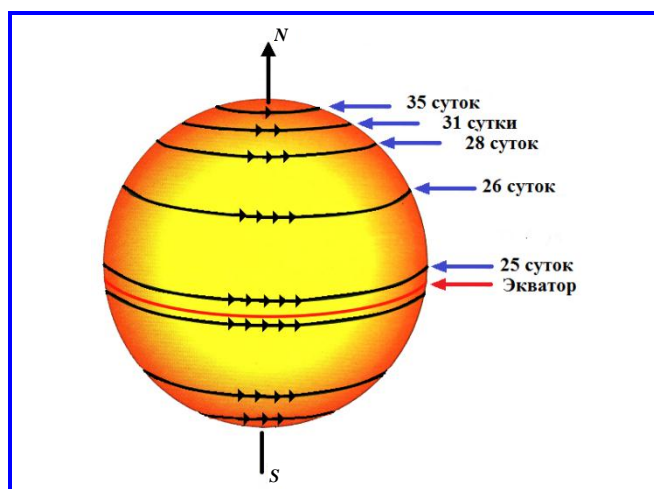


Рис. 7. Дифференциальное вращение Солнца. На разных широтах вещество Солнца вращается с разной угловой скоростью

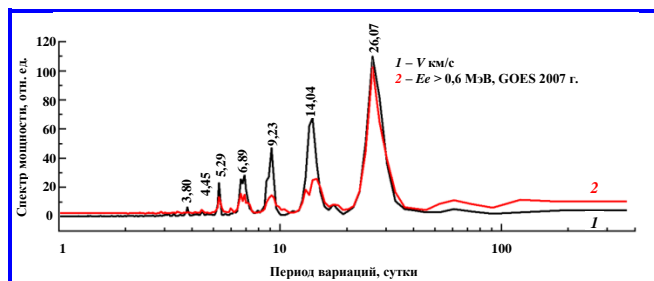


Рис. 8. Спектры мощности флуктуаций (в относительных единицах) скорости плазмы солнечного ветра и интенсивности потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли за период с 1 января по 31 декабря 2007 г.

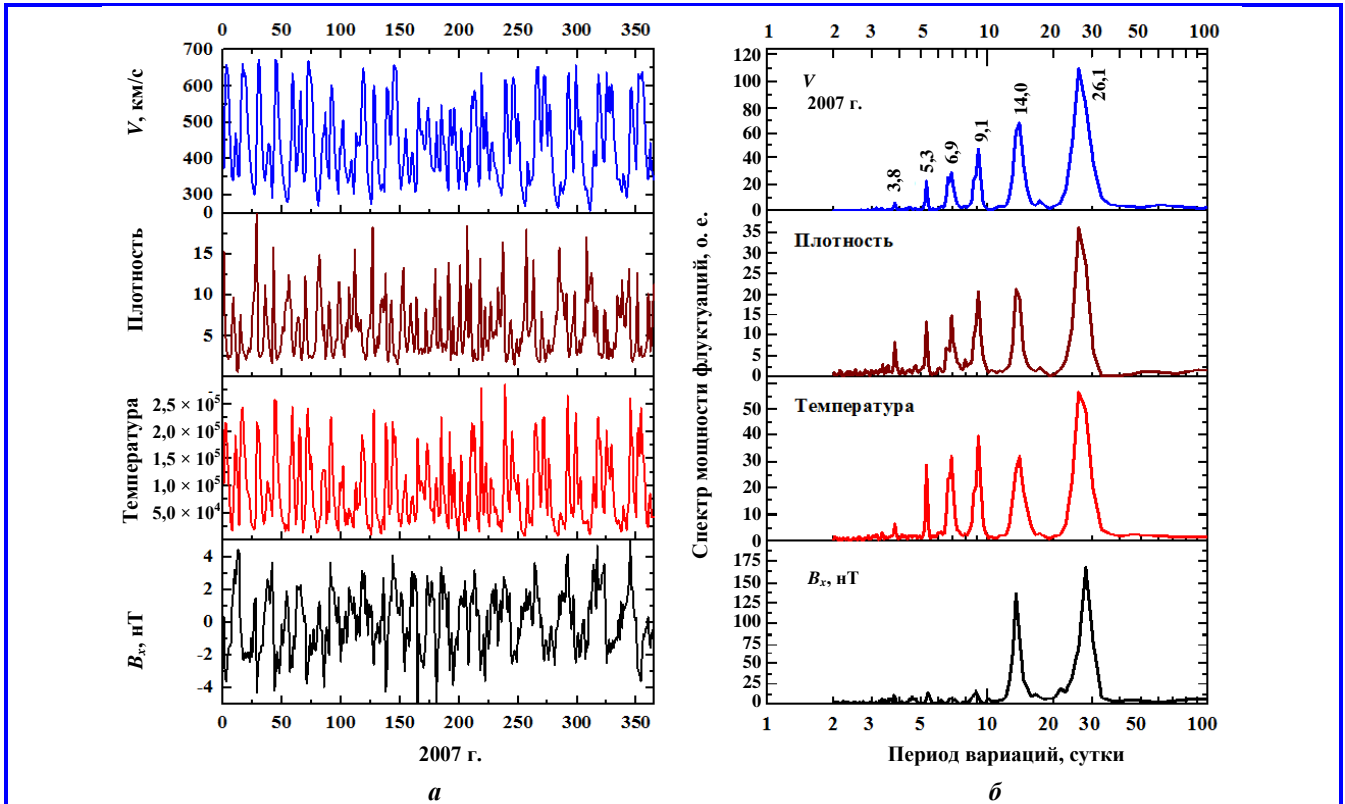


Рис. 9. Данные временных изменений параметров межпланетной среды в 2007 г. (а); данные спектра мощности флуктуаций межпланетных и геомагнитных параметров, спектра мощности флуктуаций интенсивности потоков электронов на геостационарной орбите (б)

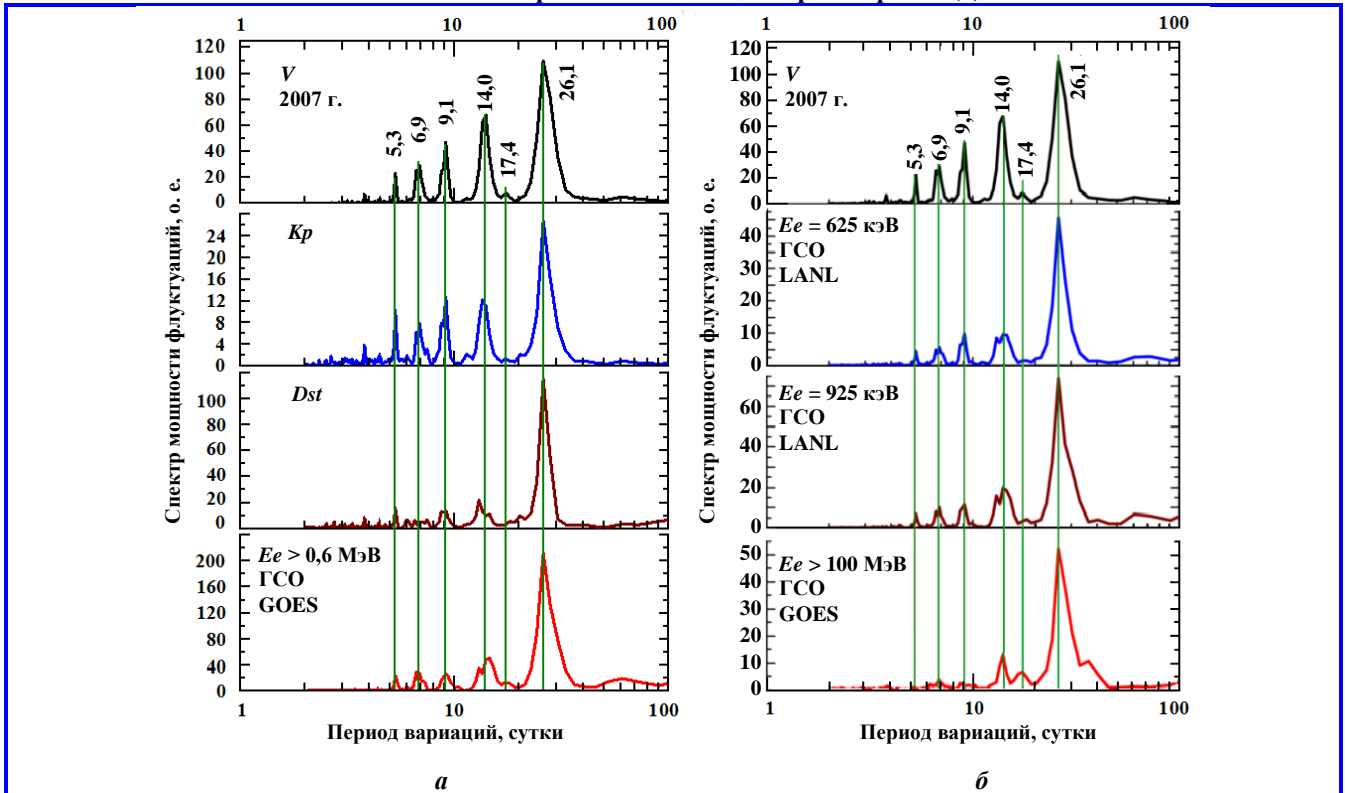
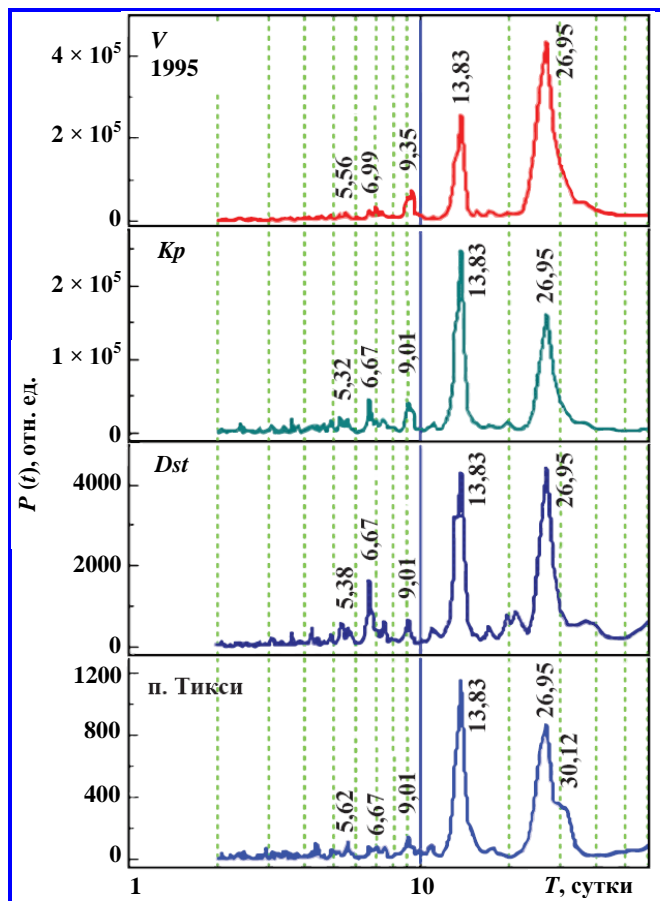


Рис. 10. Данные спектра мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и интенсивности потоков электронов на геостационарной орбите и протонов галактических космических лучей с энергией более 100 МэВ, зарегистрированных на геостационарной орбите



**Рис. 11.** Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и продолжительности суточных риометрических поглощений по данным 1995 г. (п. Тикси)

На рис. 11 приведена спектральная мощность флуктуаций скорости солнечного ветра  $V$ , индексов геомагнитной активности и продолжительности суточных риометрических поглощений по данным 1995 г. (п. Тикси) [12]. Риометрические данные подтверждают, что в 1995 г. высыпания электронов происходили и с периодом около 26-ти суток. Заметим, что 1995 г. приходится на спад 22-го цикла солнечной активности, 2007 г. также приходится на спад солнечной активности только 23-го цикла [14].

Эти периоды характеризуются тем, что была низкая вспышечная активность Солнца, но существовали мощные рекуррентные высокоскоростные потоки солнечной плазмы, источником которых были корональные дыры. Струя высокоскоростного потока плазмы наносила удар по магнитосфере Земли с периодом, равным периоду вращения Солнца.

Из анализа вышеприведенных экспериментальных данных можно сделать вывод, что на спаде солнечной активности вблизи минимума вспышеч-

ной активности Солнца в спектрах вариаций параметров межпланетной среды, магнитосферных параметров, вариации плотности атмосферы на солнечно-синхронных орбитах, вариации интенсивности потоков ионизирующих излучений на орбитах космических аппаратов в магнитосфере Земли присутствовала частота вращения Солнца.

Связь периодичности изменения параметров межпланетной среды и магнитосферы с частотой вращения Солнца может быть использована при разработке методики их прогноза.

### Литература

1. О связи долгопериодических вариаций электронов во внешнем радиационном поясе Земли с параметрами солнечного ветра / И. П. Безродных, Ю. Г. Шафер // Космические исследования. – 1982. – Т. 20. – Вып. 4. – С. 639 – 641.
2. О связи всплесков электронов во внешнем радиационном поясе Земли с высокоскоростными потоками солнечного ветра / И. П. Безродных // Нестационарные потоки заряженных частиц в околоземном космическом пространстве. Сб. науч. трудов. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1983. – С. 73 – 77.
3. Динамика потоков электронов на геостационарной орбите и их связь с солнечной активностью / И. П. Безродных, Ю. Г. Шафер // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1983. – Т. 47. – № 9. – С. 1684 – 1686. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/198301.pdf>.
4. Потоки энергичных электронов вблизи магнитопаузы и на геостационарной орбите. Анализ экспериментальных результатов и механизм генерации / И. П. Безродных, Е. Г. Бережко, И. Я. Плотников [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физ. – 1984. – Т. 48. – № 11. – С. 2165 – 2167.
5. Всплески релятивистских электронов на магнитопаузе и во внешнем радиационном поясе / И. П. Безродных, Е. Г. Бережко, Е. И. Морозова [и др.] // Геомагнетизм и аэрномия. – 1984. – Т. 24. – № 5. – С. 818 – 820. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/198401.pdf>.
6. Вариации интенсивности потока релятивистских электронов на орбите геостационарного спутника / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, Ю. Г. Шафер // Космические исследования. – 1986. – Т. 24. – Вып. 5. – С. 762 – 769.
7. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, Ю. Г. Шафер // Космические исследования. – 1987. – Т. 25. – № 1. – С. 64 – 73.
8. Influence of Large-Scale Disturbances of Solar Wind on Dynamics of Energetic Electrons in the Outer Magnetosphere / I. P. Bezrodnykh, E. G. Berezhko, Yu. G. Shafer [et al.] // Proc. 20th ICRC. – Moscow, 1987. – Vol. 4. – P. 453 – 456.
9. Исследование внешнего радиационного пояса Земли / И. П. Безродных // Космофизические исследования в Якутии. Часть 2. – Якутск : ЯФ Изд-ва СО РАН, 2000. – С. 156 – 162. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/200003.pdf>.

10. 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. / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – С. 300 – 309. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/201702.pdf>.
11. Эффекты воздействия ионизирующих излучений на электронные компоненты малых космических аппаратов / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Материалы круглого стола «Создание малых космических аппаратов. Актуальные проблемы и пути их решения», 12 апреля 2016 г. – Истра : АО «ВНИИЭМ», 2016. – С. 156 – 170. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/201603.pdf>.
12. Безродных И. П. Радиационные эффекты в космосе. В 3-х частях. Часть 1. Радиация в околоземном космическом пространстве / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семенов. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – 106 с. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf>.
13. Модуляция интенсивности потоков частиц галактических космических лучей и частиц внешнего радиационного пояса рекуррентными высокоскоростными потоками плазмы солнечного ветра / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 157. – № 2. – С. 32 – 40. – URL : <http://jurnal.vniiem.ru/text/157/32-40.pdf>.
14. Динамика кр-индекса геомагнитной активности для семи солнечных циклов (период 1932 – 2014 годов). Сезонные вариации / И. П. Безродных, Е. И. Морозова, А. А. Петрукович [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 48–56. – URL : <http://jurnal.vniiem.ru/text/167/48-56.pdf>.

Поступила в редакцию 21.04.2022

**Иннокентий Петрович Безродных**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: [d54x@mail.ru](mailto:d54x@mail.ru). (ИКИ РАН).

**Максим Владимирович Кожухов**, кандидат технических наук, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38.

**Александр Александрович Мусалитин**, научный сотрудник, т. (495) 366-01-47.

**Владимир Тимофеевич Семёнов**, ведущий специалист, т. (495) 366-19-69.

E-mail: [d18188@mail.ru](mailto:d18188@mail.ru).

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

## VARIATIONS OF IONIZING RADIATION FLUXES IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE WITH THE SUN ROTATION RATE

I. P. Bezrodnykh, M. V. Kozhukhov  
A. A. Musalitin, V. T. Semenov

*The article considers the periods of decline in the 23rd (2007) and 22nd (1995) solar activity cycles for studying the periodic variations in the parameters of the interplanetary medium and magnetosphere. These periods are characterized by the almost complete absence of large solar flares. Almost all variations in the parameters of the interplanetary medium and magnetosphere, including periodic changes in the intensity of ionizing radiation in the geostationary orbit and in sun-synchronous orbits (due to precipitation of electrons in the auroral oval zone), were determined by recurrent high-speed solar plasma streams (jets), the sources of which were long-lived (several rotations of the Sun) coronal holes. For these periods, it was concluded that the Sun rotation rate was present in the Earth's magnetosphere during the decline of solar activity near the minimum of solar flare activity in the spectra of variations in the parameters of the interplanetary medium, magnetospheric parameters, variations in the density of atmosphere in sun-synchronous orbits, variations in the intensity of ionizing radiation fluxes in the orbits of spacecrafts. The relationship between the frequency of changes in the parameters of the interplanetary medium and magnetosphere and the Sun rotation rate can be used for development of the method for their forecast.*

**Key words:** interplanetary medium, Earth's magnetosphere, Earth's radiation belts, solar activity, solar wind, coronal holes, rotation rate of the Sun.

### References

1. About the Connection Between Long-term Variations of Electrons in the Earth's Outer Radiation Belt and Solar Wind Parameters / I. P. Bezrodnykh, Yu. G. Shafer // Space Research. – 1982. – Vol. 20. – Issue 4 – Pp. 639 – 641.
2. About the Relationship between Electron Bursts in the Outer Radiation Belt of the Earth and High-speed Solar Wind Streams / I. P. Bezrodnykh // Non-stationary Streams of Charged Particles in Near-Earth Space. Collected Proceedings – Yakutsk: Yakutsk Branch of Siberian Branch of USSR Academy of Sciences, 1983. – Pp. 73 – 77.



3. Dynamics of Electron Fluxes in Geostationary Orbit and their Relationship with Solar Activity / I. P. Bezrodnykh, Yu. G. Shafer // News of USSR Academy of Sciences. Physics. – 1983. – Vol. 47. – No 9. – Pp. 1684 – 1686. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/198301.pdf>.
4. Fluxes of Energetic Electrons near the Magnetopause and in Geostationary Orbit. Analysis of Experimental Results and Generation Mechanism / I. P. Bezrodnykh, E. G. Berezhko, I. Ya. Plotnikov [et al.] // News of USSR Academy of Sciences. Physics. – 1984. – Vol. 48. – No. 11. – Pp. 2165 – 2167.
5. Bursts of Relativistic Electrons at the Magnetopause and in the Outer Radiation Belt / I. P. Bezrodnykh, E. G. Berezhko, E. I. Morozova [et al.] // Geomagnetism and Aeronomy. – 1984. – Vol. 24. – No. 5. – Pp. 818 – 820. – URL : <http://d54x.ru/articles/02/198401.pdf>.
6. Variations in the Intensity of the Relativistic Electron Flux in the Orbit of a Geostationary Satellite / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, Yu. G. Shafer // Space Researches. – 1986. – Vol. 24. – Issue 5. – Pp. 762 – 769.
7. Influence of Large-Scale Solar Wind Disturbances on Dynamics of Energetic Electrons in the Earth's Magnetosphere / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, Yu. G. Shafer // Space Research. – 1987. – Vol. 25. – No. 1 – Pp. 64 – 73.
8. Influence of Large-Scale Solar Wind Disturbances on Dynamics of Energetic Electrons in the Outer Magnetosphere / I. P. Bezrodnykh, E. G. Berezhko, Yu. G. Shafer [et al.] // Proc. 20th ICRC. – Moscow, 1987. – Vol. 4. – Pp. 453 – 456.
9. Study of the Outer Radiation Belt of the Earth / I. P. Bezrodnykh // Cosmophysical Researches in Yakutia. Part 2. - Yakutsk : Yakutsk Branch of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. – Pp. 156 – 162. – URL: <http://d54x.ru/articles/02/200003.pdf>.
10. Structure of the Energy Spectra of Electron Fluxes of the Outer Radiation Belt of the Earth and the Dynamics of the Absorbed Radiation Dose during the Period of Minimum Solar Activity in 2007 and 2009 / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Proceedings of the 4th International Scientific Conference 'Critical Issues in Designing of ERS Systems'. Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. Appendix 2016. – Moscow: VNIIEEM Corporation JSC, 2017. – Pp. 300 – 309. – URL: <http://d54x.ru/articles/02/201702.pdf>.
11. Impact of Ionizing Radiation on the Electronic Components of Small Spacecrafts / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Proceedings of the Round Table 'Creation of Small Spacecrafts. Critical Issues and their Solutions', April 12, 2016 – Istra: JSC NIIEM, 2016. – Pp. 156 – 170. – URL: <http://d54x.ru/articles/02/201603.pdf>.
12. I. P. Bezrodnykh. Radiation Effects in Space. In 3 parts. Part 1. Radiation in Near-Earth Space / I. P. Bezrodnykh, A. P. Tiutnev, V. T. Semenov. – Moscow: VNIIEEM Corporation JSC, 2014. – P. 106. – URL: <http://d54x.ru/articles/02/201401.pdf>.
13. Modulation of the Intensity of Galactic Cosmic Ray Particle Fluxes and Particles of the Outer Radiation Belt by Recurrent High-Speed Solar Wind Plasma Streams / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow: VNIIEEM Corporation JSC, 2017. – Vol. 157. – No. 2. – Pp. 32 – 40. – URL: <http://jurnal.vniiem.ru/text/157/32-40.pdf>.
14. Dynamics of Kp-index of Geomagnetic Activity for Seven Solar Cycles (over the period of 1932 - 2014). Seasonal Variations / I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich [et al.] // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – Moscow: VNIIEEM Corporation JSC, 2018. – Vol. 167. – No. 6. – Pp. 48 – 56. – URL: <http://jurnal.vniiem.ru/text/167/48-56.pdf>.

**Innokentii Petrovich Bezrodnykh**, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,  
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: [d54x@mail.ru](mailto:d54x@mail.ru).

(Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAN)).

**Maxim Vladimirovich Kozhukhov**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory, tel.: (495)366-38-38.

**Aleksandr Aleksandrovich Musalitin**, Researcher, tel.: (495) 366-01-47.

**Vladimir Timofeevich Semenov**, leading specialist, tel.: (495) 366-19-69.

E-mail: [d18188@mail.ru](mailto:d18188@mail.ru).

(JC «VNIIEEM Corporation»).