

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
М. Н. Будяк, М. В. Кожухов, В. Т. Семёнов

Для периода (с 01.01.2007 г. по 31.12.2007 г.), относящегося к концу спада 24-го цикла солнечной активности (минимум солнечной активности наблюдался в 2009 г.), по данным космических аппаратов за пределами магнитосферы Земли, наблюдались вариации скорости плазмы солнечного ветра, плотности, температуры, напряжённости межпланетного магнитного поля и интенсивности потоков частиц галактических космических лучей. По данным геостационарных космических аппаратов наблюдались вариации интенсивности потоков электронов с энергией от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ во внешнем радиационном поясе Земли. По данным наземных станций наблюдались вариации индексов геомагнитной активности. Показано, что в 2007 г. наибольшая мощность вариаций параметров межпланетной среды, индексов геомагнитной активности и потоков ионизирующих излучений во внешнем радиационном поясе Земли наблюдалась на частоте вращения Солнца. Показано, что вблизи минимума солнечной активности интенсивность потока частиц галактических космических (с энергией от 30 до 100 МэВ) внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока солнечной плазмы меньше, чем в окружающем космическом пространстве. Показано, что мощность спектра турбулентности межпланетного магнитного поля внутри рекуррентного высокоскоростного потока плазмы почти в 10 раз больше, чем в окружающем космическом пространстве.

Ключевые слова: межпланетная среда, магнитосфера Земли, рекуррентные потоки солнечного ветра, скорость солнечного ветра, радиационные пояса Земли, турбулентность межпланетного магнитного поля, галактические космические лучи.

Введение. Поскольку все планеты Солнечной системы находятся непосредственно в короне Солнца, то экспериментальные результаты, указывающие на зависимость радиационных условий в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли от проявления солнечной активности, кажутся очевидными. Всё межпланетное пространство заполнено потоками солнечной плазмы (частицами солнечного ветра). Солнечный ветер с «вмороженным» в него магнитным полем движется от Солнца к границе Солнечной системы со сверхзвуковой скоростью. Скорость распространения звука в межпланетной среде около 60 км/с, а скорость плазмы солнечного ветра в основном колеблется от 250 до 1000 км/с, в редких событиях может достигать нескольких тысяч км/с. С каждым оборотом Солнца струя высокоскоростного потока плазмы из корональной дыры «бьёт» по магнитосфере Земли, меняя состояние геомагнитосферы и окружающей межпланетной среды. В данной работе мы пытаемся выяснить, как происходят эти изменения и насколько они существенны.

Основные параметры солнечного ветра: скорость, плотность, температура плазмы, ориентация и напряжённость межпланетного магнитного поля зависят от процессов на Солнце и, соответственно, по этой причине периодически изменяются с частотой вращения Солнца. Вещество Солнца на разных широтах вращается с разной угловой скоростью. Наиболее часто источники струй быстрого солнеч-

ного ветра находятся на гелиоширотах, на которых вещество Солнца делает один оборот вокруг своей оси за период времени от 26 до 27 суток.

Впервые важная роль скорости солнечного ветра в динамике релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) была выявлена при проведении эксперимента на советских геостационарных космических аппаратах «Радуга» [1, 2]. Было показано, что всегда при возрастании скорости солнечного ветра в магнитосфере Земли наблюдается возрастание интенсивности потока релятивистских электронов. Было установлено, что наиболее сильное возрастание потока релятивистских электронов в ВРПЗ наблюдается при пересечении магнитосферой Земли струй рекуррентных (периодически повторяющихся с каждым оборотом Солнца) высокоскоростных потоков плазмы солнечного ветра [3 – 6].

Динамика потоков релятивистских электронов в ВРПЗ зависит от параметров межпланетной среды. Скорость плазмы солнечного ветра определяет, до какой энергии на границе магнитосферы могут быть ускорены частицы [3, 4]. Плотность и температура плазмы солнечного ветра определяет, какое количество частиц будет вовлечено в процесс ускорения. Продолжительность времени, в течение которого наблюдается отрицательное значение V_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), определяет, насколько долго существуют благоприятные условия для проникновения частиц из межпланетной

среды внутрь магнитосферы Земли. При отрицательном значении B_z -компоненты ММП происходит пересоединение силовых линий межпланетного магнитного поля и магнитного поля магнитосферы Земли, что облегчает проникновение частиц из межпланетной среды в магнитосферу.

Скорость (так и все другие параметры) солнечного ветра постоянно меняется. В низкочастотной области спектр мощности флуктуаций параметров солнечного ветра имеет дискретный характер, в высокочастотной области – непрерывный. Можно говорить, что в низкочастотной области спектра параметры солнечного ветра пульсируют на нескольких чётко выделенных частотах. Наибольшая мощность пульсаций наблюдается на частоте вращения Солнца, точнее на частоте вращения той части Солнца, где располагается источник струи высокоскоростного потока солнечной плазмы. Изменение состояния параметров межпланетной среды (параметров солнечного ветра) всегда сопровождается изменением радиационной обстановки в окружающем пространстве. Чем больше параметров межпланетной среды нам известно, тем с большей точностью мы можем предсказать, как под их влиянием изменится радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве. Процессы в магнитосфере Земли обладают инертностью, они не могут внезапно возникнуть и также внезапно затухнуть. По этой причине при прогнозе эффекта влияния параметров межпланетной среды на динамику процессов в магнитосфере Земли необходимо учитывать и предшествующее состояние магнитосферы.

Влияние межпланетной среды на динамику энергичных заряженных частиц в ВРПЗ. В низкочастотной области (периоды более суток) спектр флуктуаций параметров межпланетной среды и магнитосферы Земли дискретный. Основные частоты пульсаций совпадают с частотой вращения Солнца и частотой смены знака ММП. В высокочастотной области (периоды менее суток) спектр пульсаций ММП непрерывный и характеризует степень турбулентности плазмы солнечного ветра и вмороженного в него магнитного поля. Чем больше мощность турбулентности ММП, тем большее сопротивление межпланетная среда оказывает движущимся в ней заряженным частицам солнечных и галактических космических лучей.

На рис. 1 показаны периодические вариации скорости плазмы солнечного ветра вблизи магни-

тосферы Земли, интенсивности дифференциального потока электронов с энергией 925 кэВ на геостационарной орбите, показателя дифференциального спектра потока релятивистских электронов и вариации отрицательных значений B_z -компоненты ММП. При возрастании скорости солнечного ветра, наблюдается возрастание интенсивности потока электронов в ВРПЗ. При одной и той же скорости ветра, возрастание потока электронов сильнее, если более длительное время B_z -компонента имеет отрицательное значение. При пересечении магнитосферой Земли переднего фронта струи рекуррентного высокоскоростного потока плазмы, в ВРПЗ наблюдается резкое смягчение энергетического спектра электронов. После прохождения максимума высокоскоростного потока плазмы солнечного ветра, энергетический дифференциальный спектр релятивистских электронов ужесточается, и в конце спада скорости потока плазмы показатель дифференциального спектра релятивистских электронов в ВРПЗ достигает величины ~ 2 , а затем возвращается к исходным значениям. Пример изменения энергетического спектра электронов в ВРПЗ при прохождении высокоскоростного потока плазмы показан на рис. 2. Вблизи минимума солнечной активности при относительно спокойном общем фоне чётко выделяются отдельные струи высокоскоростных потоков плазмы, вытекающих из корональных дыр (см. рис. 1). При каждом обороте Солнца магнитосфера Земли взаимодействует со струей высокоскоростного потока плазмы. На рис. 3 показан спектр мощности флуктуаций ММП за период с 1998 по 2006 гг. (рис. 3 является адаптированной версией рисунка из работы [7]). В низкочастотной области спектра мощности флуктуаций ММП имеет дискретный спектр. На частоте вращения Солнца (соответствующий период вращения для средних широт от 26 до 27 суток) наблюдается максимальная мощность флуктуаций ММП.

В высокочастотной области спектр флуктуаций непрерывный и падающий с увеличением частоты. Непрерывный спектр флуктуаций характерен для турбулентности, в данном случае это указывает на то, что внутри потока солнечного ветра плазма с «вмороженным» в неё магнитным полем движется хаотично. Возможно, это хаотичное движение плазмы представляет собой спектр вихревых движений в разных плоскостях. Нечто аналогичное мы видим, наблюдая за вихревым движением воды, выходящей из под винтов теплохода.

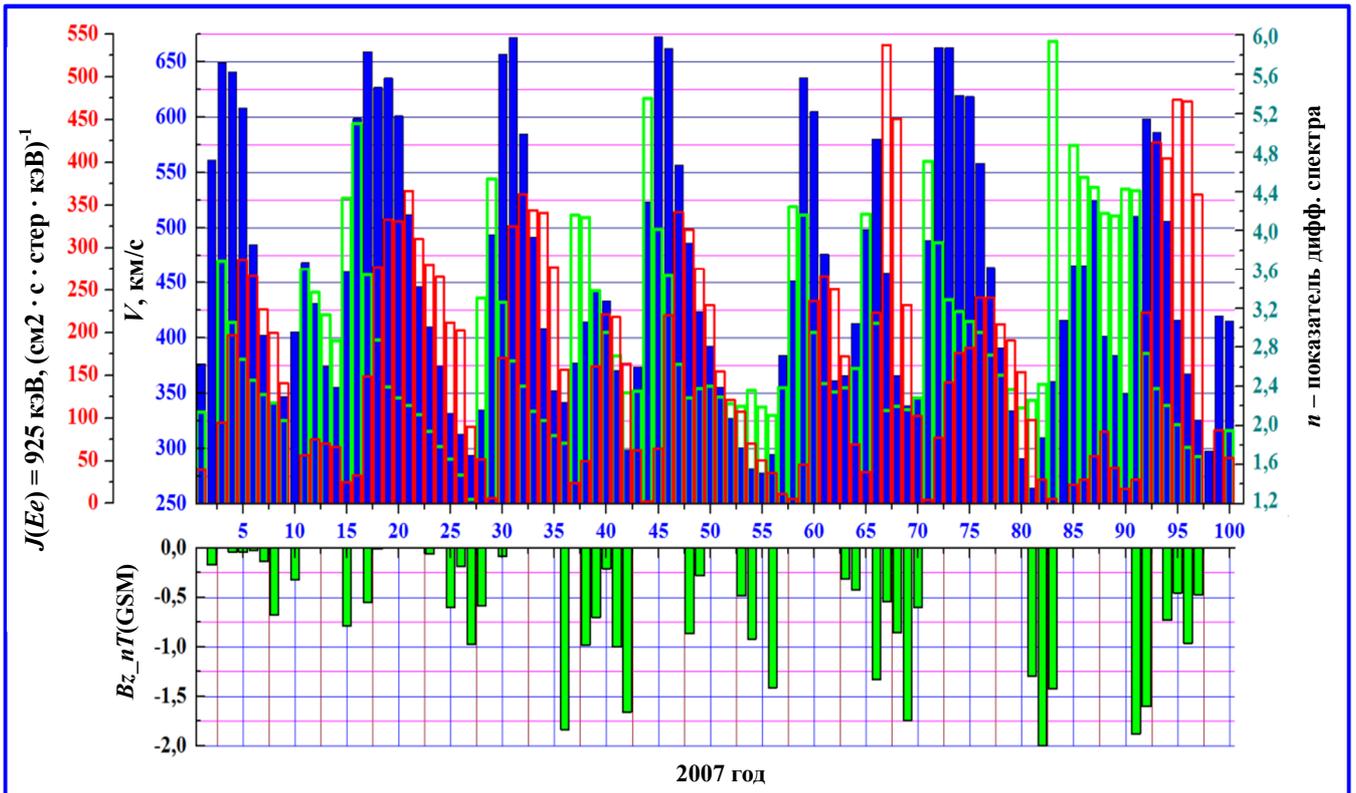


Рис. 1. Данные за первые 100 дней 2007 г.: скорость плазмы солнечного ветра, дифференциальный поток электронов с энергией 925 кэВ на геостационарной орбите (ГСО), n – показатель степени дифференциального спектра электронов $J(E) = AE^{-n}$ ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}^{-1}$) в интервале энергии от 625 до 925 кэВ и отрицательные значения B_z -компоненты межпланетного магнитного поля

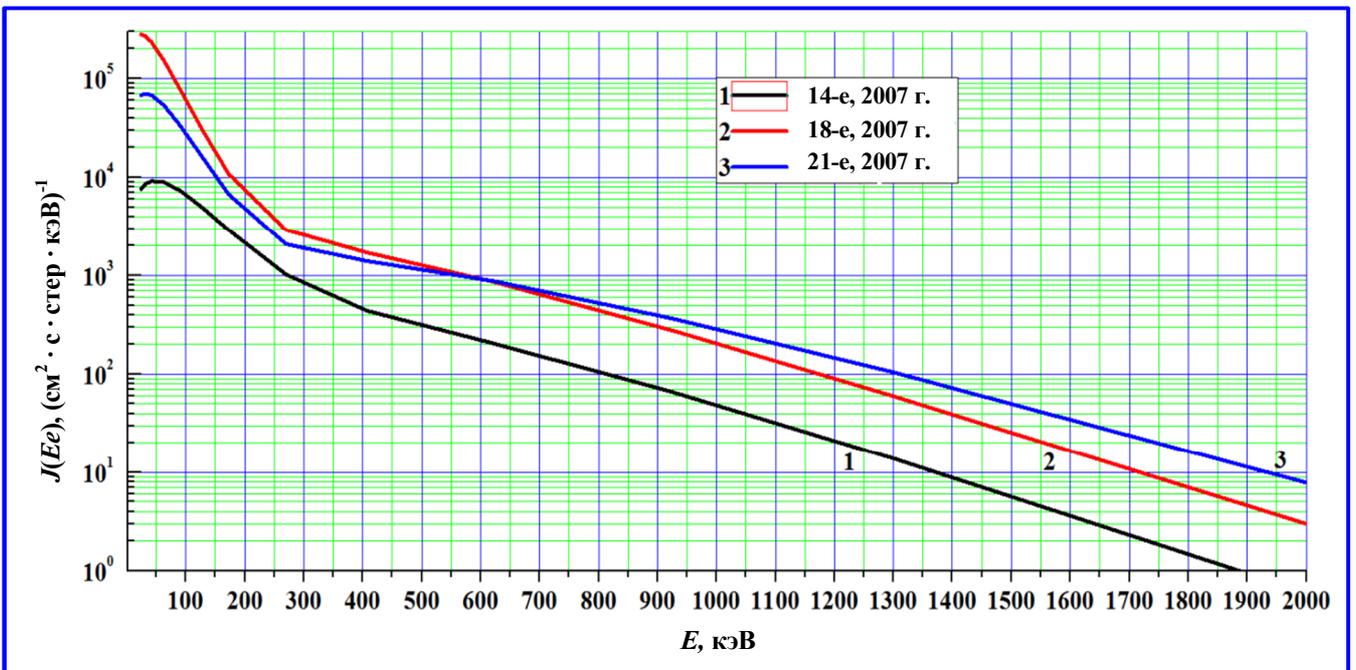


Рис. 2. Пример эволюции дифференциального энергетического спектра электронов в диапазоне энергии от нескольких десятков кэВ до нескольких тысяч кэВ на геостационарной орбите в период прохождения рекуррентного высокоскоростного потока плазмы солнечного ветра

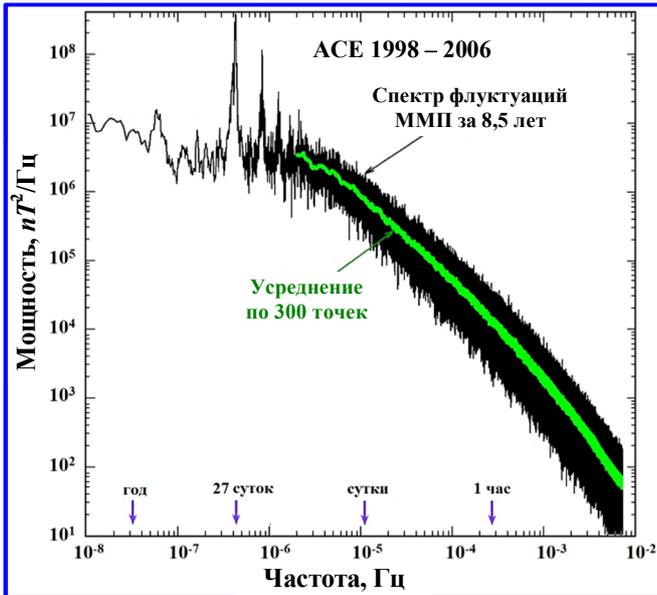


Рис. 3. Средний спектр мощности флуктуаций ММП за период с 1998 по 2006 гг. [7]

Для более детального исследования периодических изменений параметров межпланетной среды и магнитосферы Земли, мы выбрали период с 1 января до 31 декабря 2007 г. Заметим, что 2007 г. соответствует периоду спада 23 цикла солнечной активности, когда, на фоне угасающей солнечной активности, чётко проявляются струи высокоскоростных потоков плазмы из корональных дыр. Вверху слева на рис. 4 приведены данные [8] измерений параметров межпланетной среды, полученные космическим аппаратом АСЕ: скорости солнечного ветра; плотности плазмы; температуры плазмы; V_x -компоненты ММП. Вверху справа представлены спектры мощности флуктуаций этих параметров в относительных единицах. Наибольшая мощность флуктуаций всех параметров наблюдается на частоте вращения Солнца (соответствующий период около 26 суток). Период около 14 суток, вероятно, связан с секторными структурами ММП. Внизу слева на рис. 4 представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра; K_p -индекса геомагнитной активности, который характеризуют степень возмущённости геомагнитного поля (т. е. степень интенсивности «дрожания» силовых линий поля); D_{st} – индекса геомагнитной активности, который характеризует интенсивность электрического тока, протекающего в области магнитного экватора вокруг Земли, на расстоянии нескольких земных радиусов от её поверхности; интегрального потока электронов (с энергией более 0,6 МэВ) на геостационарной орбите (ГСО).

На рис. 4 представлены данные спектра мощности флуктуаций: скорости солнечного ветра; дифферен-

циальных потоков электронов с энергией 625 и 925 кэВ; интегрального потока протонов галактических космических лучей (ГКЛ) с энергией более 100 МэВ. Из данных, приведённых на рис. 4, следует, что максимальная мощность флуктуаций параметров межпланетной среды и геомагнитосферы сосредоточена на частоте вращения Солнца.

На рис. 5, а представлена фотография Солнца в рентгеновских лучах, корональная дыра обведена красным. На рис. 5, б схематично показана струя быстрого солнечного ветра, вытекающая из корональной дыры. Вблизи максимума солнечной активности уровень турбулентности ММП в высокоскоростном рекуррентном потоке (в струе) солнечного ветра может быть меньше, чем в окружающем пространстве. По этой причине среда в межпланетном пространстве может создавать распространению частиц ГКЛ большее сопротивление, чем среда внутри рекуррентного высокоскоростного потока. Рекуррентный высокоскоростной поток в этот период может служить каналом, по которому частицы ГКЛ проникают в центральные области солнечной системы. Вблизи минимума солнечной активности, на фоне «погасшей» солнечной активности, уровень турбулентности ММП в пространстве внутри струи плазмы будет больше, чем в окружающем пространстве. По этой причине среда внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока будет оказывать большее сопротивление распространению частиц ГКЛ (коэффициенты диффузии частиц ГКЛ будут меньше). В отличие от периода максимальной солнечной активности, в минимуме солнечной активности, внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока, будет наблюдаться более низкий уровень радиации от частиц ГКЛ, чем в окружающем межпланетном пространстве.

Вблизи минимума солнечной активности, при межпланетных перелётах, космические аппараты, двигающиеся внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока, за одно и то же время получают меньшую дозу радиации, чем космические аппараты, находящиеся за пределами струи рекуррентного потока.

На рис. 6 за период с 200-го дня по 365-й день 2007 г. показаны временные ряды данных скорости солнечного ветра, интенсивности интегрального потока протонов ГКЛ с энергией более 100 МэВ (на ГСО) и потока протонов ГКЛ с энергией более 30 МэВ за пределами магнитосферы (по данным космического аппарата АСЕ). Из данных, представленных на рис. 6, следует, что интенсивность радиации внутри струи рекуррентного потока меньше, чем за её пределами.

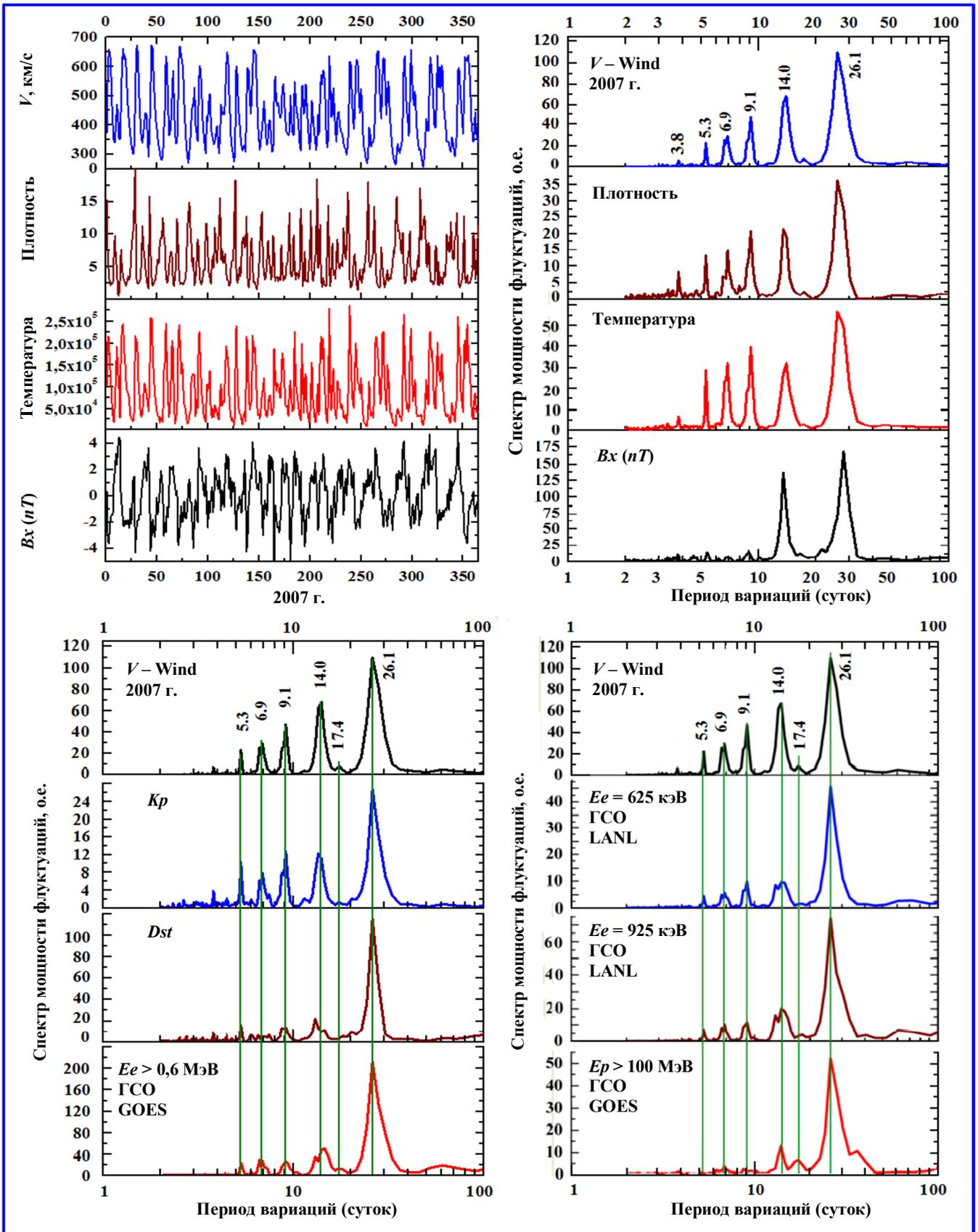


Рис. 4. Данные временных изменений параметров межпланетной среды в 2007 г; данные спектра мощности флуктуаций межпланетных и геомагнитных параметров, спектра мощности флуктуаций интенсивности потоков электронов и протонов на ГСО

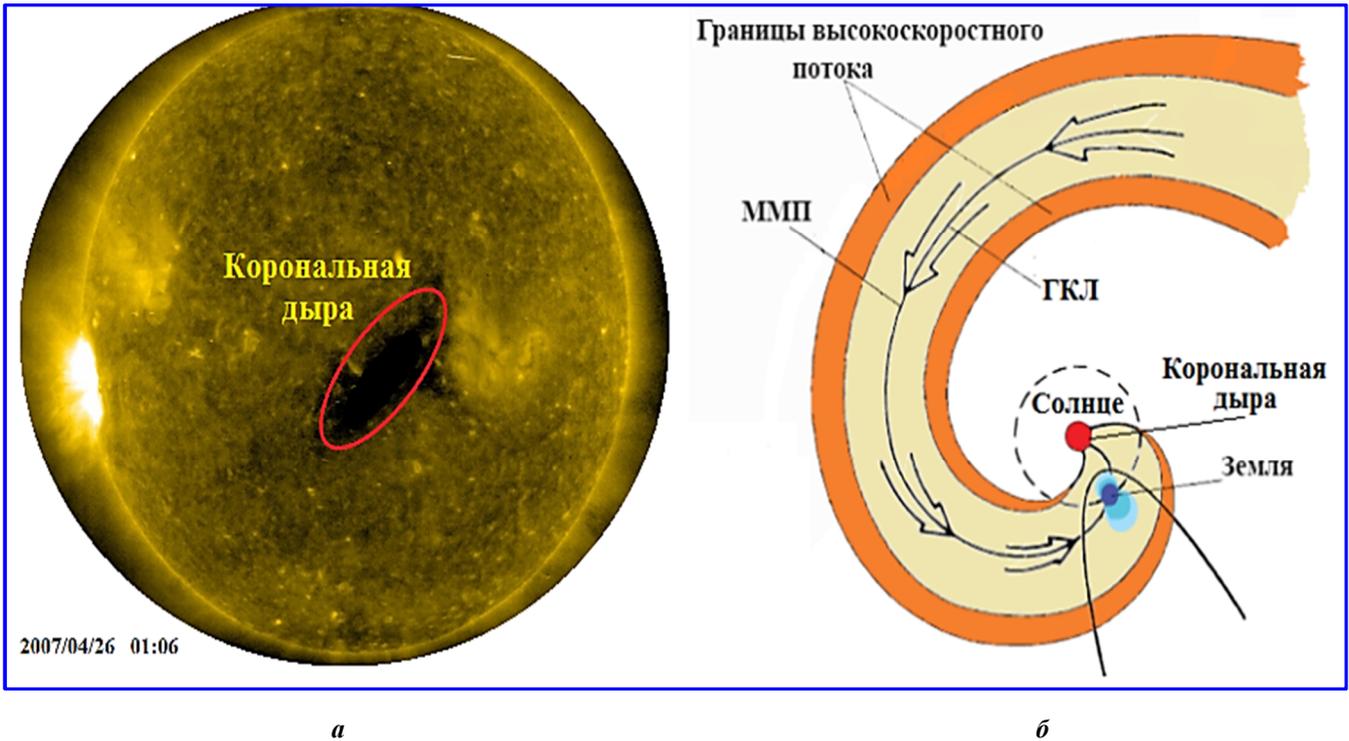


Рис. 5. Фотография Солнца в рентгеновских лучах (а); схема струи рекуррентного высокоскоростного потока плазмы из корональной дыры (б)

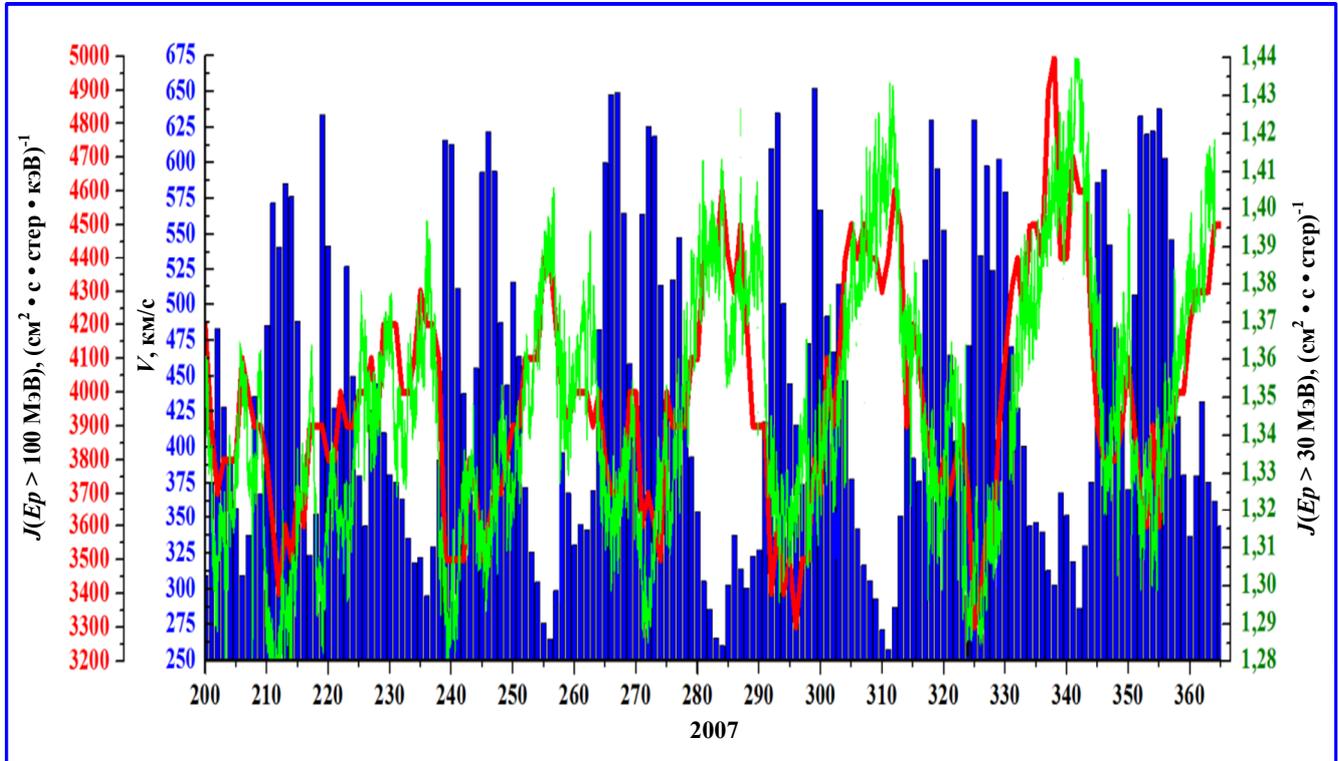


Рис. 6. Данные скорости плазмы солнечного ветра и интегральных потоков частиц ГКЛ за период с 200-го дня по 365-й день 2007 г. Интенсивность потоков частиц ГКЛ пульсирует в противофазе с изменением скорости солнечного ветра

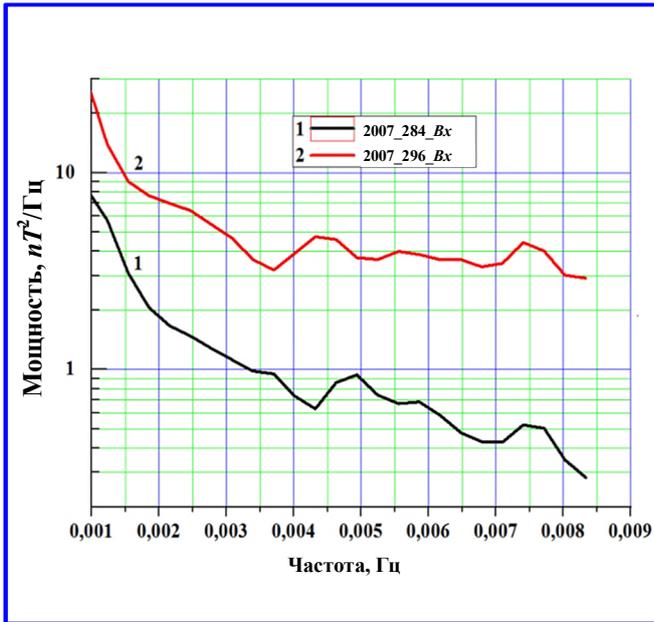


Рис. 7. Спектр мощности турбулентности V_x -компоненты ММП за пределами струи рекуррентного высокоскоростного потока солнечной плазмы за 284-й день (1) и внутри струи за 296-й день 2007 г. (2)

На рис. 7. показано, что внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока солнечной плазмы мощность турбулентности ММП выше, чем за её пределами. Следовательно, внутри струи коэффициенты диффузии частиц ГКЛ меньше, чем за пределами струи, и, соответственно, интенсивность потока частиц ГКЛ внутри струи меньше, как показано на рис. 6.

Выводы

В 2007 г. наибольшая мощность вариаций параметров межпланетной среды, индексов геомагнитной активности и потоков ионизирующих излучений во внешнем радиационном поясе Земли наблюдалась на частоте вращения Солнца.

Вблизи минимума солнечной активности интенсивность потока частиц галактических космических (с энергией от 30 до 100 МэВ) внутри струи рекуррентного высокоскоростного потока солнеч-

ной плазмы меньше, чем в окружающем космическом пространстве.

Мощность спектра турбулентности межпланетного магнитного поля внутри рекуррентного высокоскоростного потока плазмы почти в 10 раз больше, чем в окружающем космическом пространстве.

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. – 1983. – Т. 47. – № 9. – С. 1684 – 1686. – (Сер. Физ).
3. 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. – 1984. – Т. 48. – № 11. – С. 2165 – 2167. – (Сер. Физ).
4. 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. – № 5. – С. 818 – 820.
5. Безродных И. П., Морозова Е. И., Шафер Ю. Г. Влияние крупномасштабных возмущений солнечного ветра на динамику энергичных электронов в магнитосфере Земли // Космические исследования. – 1987. – Т. 25. – № 1. – С. 64 – 73.
6. Bezrodnykh I. P., Berezhko E. G., Shafer Yu. G., Shtygashev I. E., Morozova E. I., Pissarenko N. F., Mineev Yu. V., Spirikova E. S., Shavrin P. I. Influence of Large-Scale Disturbances of Solar Wind on Dynamics of Energetic Electrons in the Outer Magnetosphere // Proc. 20th ICRC. – Moscow, 1987. – V. 4. – P. 453 – 456.
7. Borovsky Joseph E. The velocity and magnetic field fluctuations of the solar wind at 1 AU: Statistical analysis of Fourier spectra and correlations with plasma properties // J. Geophys. Res. – Vol. 117, A05104, doi:10.1029/2011JA017499, 2012 : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://d54x.ru/articles/18/JGR201201.pdf>, свободный.
8. База данных с космических аппаратов : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://heliophysicsdata.sci.gsfc.nasa.gov/websearch/dispatcher>, свободный.

Поступила в редакцию 07.07.2017

Иннокентий Петрович Безродных, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Анатолий Алексеевич Петрукович, член-корреспондент РАН, заместитель директора ИКИ РАН, т. (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru (ИКИ РАН).

Мария Николаевна Будяк, научный сотрудник, т. (495) 366-38-38, e-mail: maboudiak@mail.ru.

*Максим Владимирович Кожухов, кандидат технических наук, начальник лаборатории,
т. (495)366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.*

*Владимир Тимофеевич Семёнов, ведущий специалист, т. (495) 366-38-38, e-mail:d18188@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

MODULATION OF GALACTIC COSMIC RAYS AND OUTER RADIATION BELT PARTICLE FLUXES INTENSITY BY RECURRENT HIGH-SPEED STREAMS OF SOLAR WIND PLASMA

**I. P. Bezrodnykh, E. I. Morozova, A. A. Petrukovich,
M. N. Budiak, M. V. Kozhukhov, V. T. Semenov**

In the time period (from 01.01.2007 till 31.12.2007), relating to the end phase of the 24th solar activity cycle decline (the minimum solar activity was observed in 2009), satellites orbiting outside the Earth's magnetosphere provided information that variations have been registered of solar wind plasma speed, as well as of density, temperature and intensity of interplanetary magnetic field, and of galactic cosmic rays particle fluxes intensity. In the Earth's outer radiation belt, the geostationary satellites registered intensity variations of electron fluxes with the electrons energy of several tens of keV to several MeV. The ground stations observed variations of geomagnetic activity indexes. The authors have showed that the maximum variation intensity of interplanetary medium parameters, geomagnetic activity indexes and ionizing radiation fluxes in the Earth's outer radiation belt was observed at the speed of Sun rotation. The authors also have demonstrated that close to the Sun activity minimum, the intensity of particle flux (with the particles energy of 30 to 100 MeV) of galactic cosmic rays within the high speed recurrent stream of solar plasma was lower than in the surrounding space environment. The turbulence spectrum intensity of the interplanetary magnetic field within the high speed recurrent plasma stream has been demonstrated to be 10 times more than in the surrounding space environment.

Key words: *interplanetary environment, Earth's magnetosphere, recurrent streams of solar wind, solar wind speed, Earth's radiation belts, turbulence of the interplanetary magnetic field, galactic cosmic rays.*

List of References

1. Bezrodnykh I. P., Shafer Iu. G. About dependence of long-period variations of electrons in the Earth's outer radiation belt on solar wind parameter values // *Kosmicheskie issledovaniya* [Космические исследования]. – 1982. – V. 20. – Issue 4. – Pp. 639 – 641.
2. Bezrodnykh I. P., Shafer Iu. G. Dynamics of electron streams at the geostationary orbit and their dependence on solar activity // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*. – 1983. – Vol. 47. – Issue 9. – Pp. 1684 – 1686. – («Physics» Series).
3. Bezrodnykh I. P., Berezhko E. G., Plotnikov I. Ia., Shafer Iu. G., Morozova E. I., Pisarenko N. F. Streams of energetic electrons near the magnetopause and at the geostationary orbits. Analysis of experimental results and mechanism of generation // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR*. – 1984. – Vol. 48. – Issue 11. – Pp. 2165 – 2167. – («Physics» Series).
4. Bezrodnykh I. P., Berezhko E. G., Morozova E. I., Pisarenko N. F., Plotnikov I. Ia., Shafer Iu. G. Bursts of relativistic electrons in magnetopause and in the Earth's outer radiation belt // *Geomagnetism i aeronomiya*. [Геомагнетизм и аэрномия]. – 1984. – Vol. 24. – Issue 5. – Pp. 818 – 820.
5. Bezrodnykh I. P., Morozova E. I., Shafer Iu. G. Effect of large-scale disturbances of the solar wind on dynamics of energetic electrons in the Earth's magnetosphere // *Kosmicheskie issledovaniya* [Космические исследования]. – 1987. – V. 25. – Issue 1. – Pp. 64 – 73.
6. Bezrodnykh I. P., Berezhko E. G., Shafer Yu. G., Shtygashev I. E., Morozova E. I., Pissarenko N. F., Mineev Yu. V., Spirkova E. S., Shavrin P. I. Influence of large-scale disturbances of solar wind on dynamics of energetic electrons in the outer magnetosphere // *Proceedings of the 20th International Cosmic Ray Conference (ICRC)*. – Moscow, 1987. – V. 4. – Pp. 453 – 456.
7. Borovsky Joseph E. The velocity and magnetic field fluctuations of the solar wind at 1 AU: Statistical analysis of Fourier spectra and correlations with plasma properties // *Geophysical Research* [Геофизические исследования]. – Vol. 117, A05104, doi:10.1029/2011JA017499, 2012 : [Electronic source]. – Available at: <http://d54x.ru/articles/18/JGR201201.pdf>, open access.
8. Database of Satellite Information : [Electronic source]. – Available at : <http://heliophysicsdata.sci.gsfc.nasa.gov/websearch/dispatcher>, open access.

Innokentii Petrovich Bezrodnykh, *Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher,*
tel.: (495)333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

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

Evgeniia Ivanovna Morozova, *Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D. (Phys.-Math.)), Senior Researcher,*
tel.: (495)333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

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

Anatolii Alexeevich Petrukovich, *Corresponding member of the Russian Academy of Sciences,*
Deputy Director General of IKI RAN, tel.: (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

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

Maria Nikolaevna Budiak, Researcher, tel.: (495) 366-38-38, e-mail: maboudiak@mail.ru.

Maxim Vladimirovich Kozhukhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Laboratory,

tel.: (495)366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.

Vladimir Timofeevich Semionov, Leading Specialist, tel.: (495)366-38-38, e-mail: d18188@mail.ru.

(JC «VNIEM Corporation»).