

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ПЕРИОД МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ 2006 – 2010 гг.

И.П. Безродных, Е.И. Морозова, А.А. Петрукович,
М.Н. Будяк, В.Т. Семёнов

Рассматривается связь периодических структур в потоках солнечного ветра с динамикой корональных дыр для минимума солнечной активности 2006 – 2010 гг. и формирование периодических структур в потоках релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) и в геомагнитных параметрах Dst- и Kp-индексах. Спектральная плотность мощности флуктуаций вычислена для всех параметров (скорости солнечного ветра, потоков электронов с $E_e > 0,6$ МэВ и геомагнитных индексов). Проведён анализ распределения мощности среди гармоник периодической структуры высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ). Показано, что в 2006 – 2007 гг. основным источником 26-суточной рекуррентной гармоник в потоках СВ были долгоживущие низкоширотные корональные дыры, а возникновение 28- и 33-дневных гармоник связано с появлением среднеширотных корональных дыр. Обнаружено значительное различие в отклике магнитосферных параметров на изменение периодической структуры потоков СВ. Для всех параметров (Kp, Dst и интенсивности потока электронов $E_e > 0,6$ МэВ) проведено сравнение динамики периодических структур с динамикой рекуррентных высокоскоростных потоков СВ (2007 – 2008 гг.) и с динамикой потоков медленного СВ (2009 г.). Найдено увеличение $\sim 10 - 15$ раз спектральной плотности мощности 26-суточной гармоник в рекуррентных высокоскоростных потоках по сравнению с медленным СВ. Обнаружены значительные изменения в распределении мощности среди гармоник в периодических структурах всех параметров при изменении геошироты источников (появлении среднеширотных корональных дыр и изменении угла наклона гелиосферного токового слоя – середина 2008 – 2009 гг.). Проведено сопоставление динамики общей площади низкоширотных корональных дыр с динамикой скорости СВ, показано близкое подобие временных профилей этих величин в 2007 – 2009 гг. уменьшение площади сопровождается уменьшением скорости СВ и уменьшением потока релятивистских электронов ВРПЗ. Для этого периода обнаружена почти 100% корреляция 26-суточных вариаций полной площади низкоширотных корональных дыр и 26-суточных вариаций скорости СВ. Для 2006 – 2010 гг. вычислена динамика радиационной дозы, накопленной в ВРПЗ в течение года.

Ключевые слова: корональные дыры, высокоскоростной поток солнечного ветра, периодические структуры, индексы геомагнитной активности, внешний радиационный пояс, релятивистские электроны, поглощённая доза радиации.

В статье мы исследуем динамику периодических структур высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ), индексов геомагнитной активности (Dst и Kp) и потоков электронов с энергией $E_e > 0,6$ МэВ на геостационарной орбите для периода 2006 – 2010 гг. и их связь с корональными дырами. В процессе развития и спада солнечной активности (СА) происходит структурная перестройка солнечной короны, что сопровождается перестройкой структуры потоков солнечного ветра. Эти изменения проявляются в вариациях различных геофизических параметров внутри магнитосферы Земли, в том числе в вариациях потоков электронов внешнего радиационного пояса и геомагнитных индексов. Периодическая структура потоков солнечного ветра формируется долготно-широтным распределением источников открытых магнитных полей на Солнце (корональных дыр), их временем жизни и траекторией Земли относительно этих источников. Фундаментальной гармоникой периодических структур является синодический период вращения Солнца, ~ 27 дней на геошироте $\sim 25^\circ$, изменение геошироты источника может изменять этот период. Регистрируемые в СВ высокочастотные гармоники указывают на существование в короне нескольких достаточно стабильных источников

ветра, расположенных на разных долготах. Например, периоды $\sim 13,5$, ~ 9 суток указывают на существование в короне источников быстрого ветра, расположенных с долготным сдвигом $\sim 180^\circ$, $\sim 90^\circ$. Период $\sim 13,5$ суток регистрируется при пересечении гелиосферного токового слоя, разделяющего противоположные магнитные поля северных и южных геоширот (так называемая «двухсекторная» структура межпланетного магнитного поля). Отклик магнитосферы Земли на воздействие периодических структур потоков СВ проявляется в рекуррентной геомагнитной активности [1 – 4], в периодических вариациях потоков электронов внешнего радиационного пояса [4 – 6], в периодических вариациях ионосферной электронной плотности [7] и термосферной нейтральной плотности [8].

Особенности минимума 23/24 циклов

В работе мы рассматриваем влияние корональных дыр на формирование периодической структуры потоков СВ и появление таких периодических структур в потоках электронов внешнего радиационного пояса с энергией $E_e > 0,6$ МэВ и в структуре Dst и Kp геомагнитных индексов. Изучаемый период 2006 – 2010 гг. включает самый

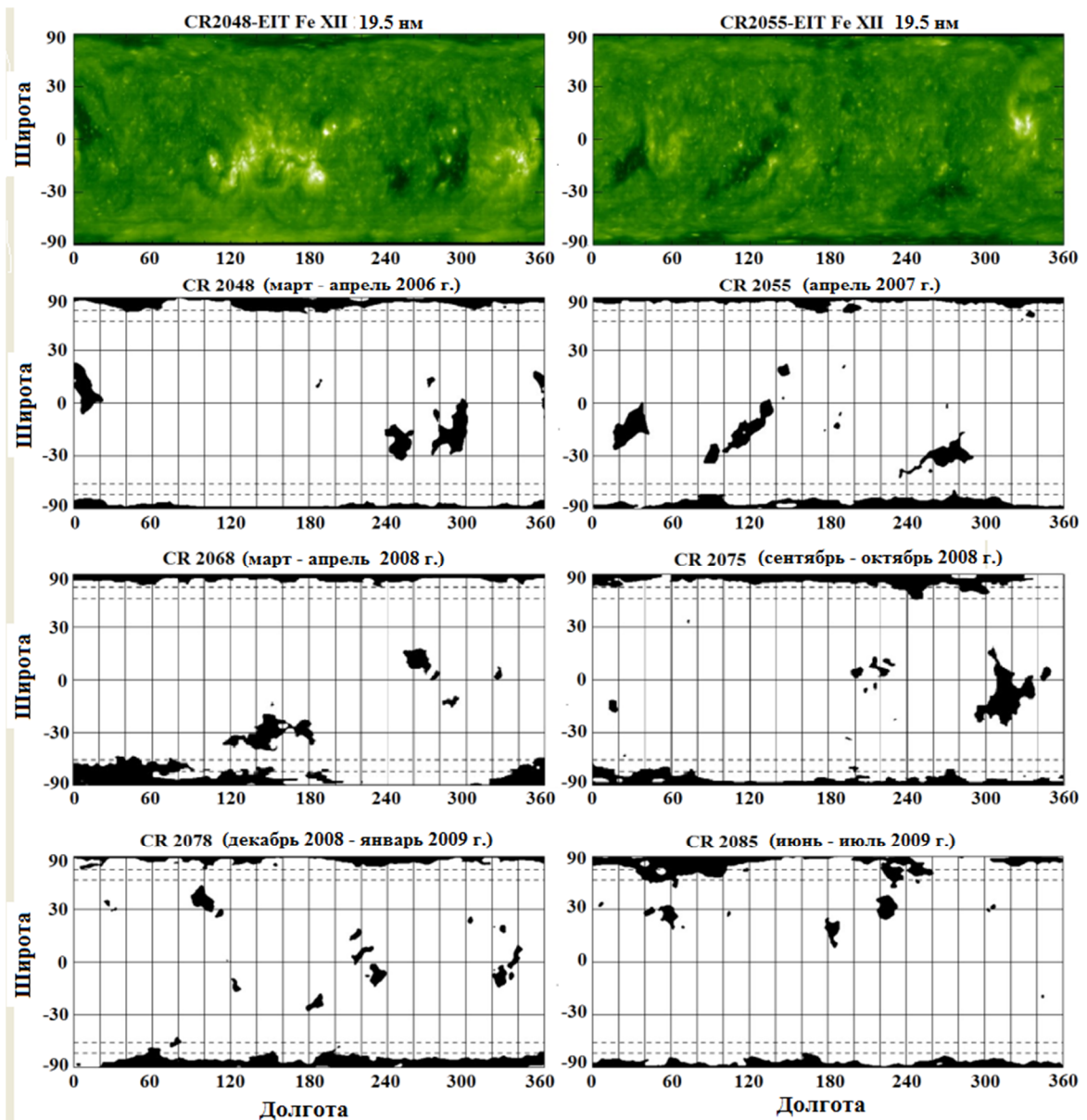


Рис. 1. Динамика корональных дыр в солнечной короне с сентября 2006 г. по июль 2009 г. [11]

необычный и длинный (три года) минимум СА между 23 и 24 циклами, 2007 – 2009 гг. Этот минимум характеризуется чрезвычайно низкой СА (среднее число солнечных пятен $\sim 4,5$), низкой величиной полярного и общего магнитного поля Солнца. Геомагнитная активность в этот период была самой слабой среди четырёх предыдущих минимумов.

В этом минимуме зарегистрирован самый медленный, самый плотный и самый холодный солнечный ветер (СВ) и самое слабое межпланетное магнитное поле. Наиболее полное описание СА, параметров межпланетной среды и геомагнитных индексов для

минимума 23/24 циклов представлено в работе [9].

Интересной и до сих непонятой особенностью структуры солнечной короны в минимуме 23/24 циклов является появление в 2006 г. и развитие в течение одного периода вращения Солнца изолированных, большой площади, низкоширотных корональных дыр [10]. Это происходило на фоне очень слабого полярного и общего магнитного поля Солнца. С сентября 2006 г. по май 2009 г. на Солнце зарегистрировано пять долгоживущих (от 7 до 27 солнечных оборотов) низкоширотных корональных дыр (три с положительным магнитным полем, две – с отрицательным [11, 12].

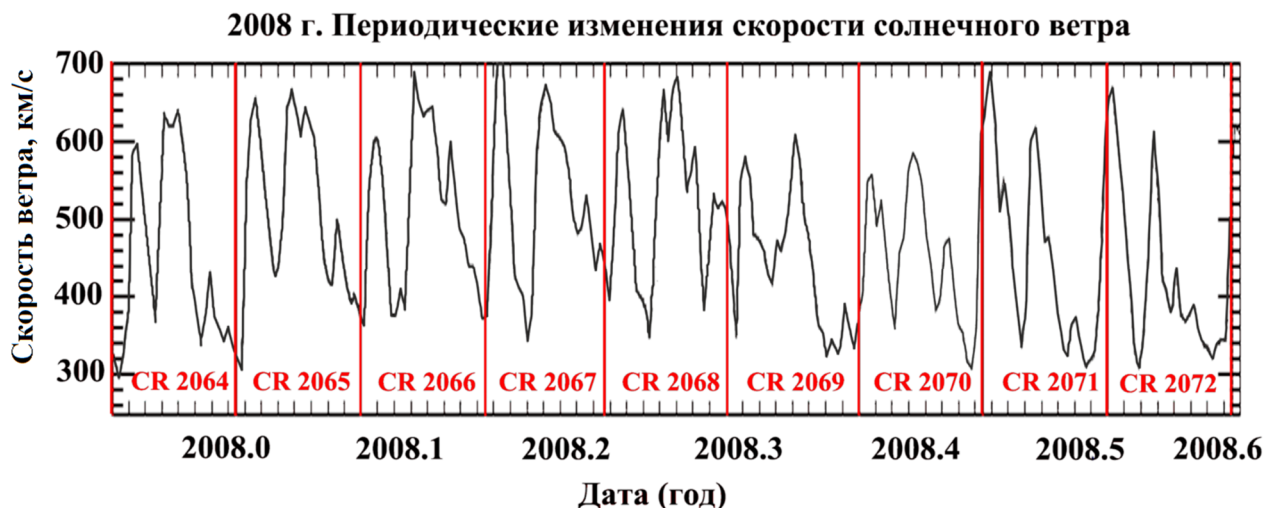


Рис. 2. Периодические изменения скорости солнечного ветра для девяти 27-дневных солнечных оборотов (выделены красными вертикальными линиями) [12]. Красным отмечены соответствующие каррингтоновые номера. На графике начало оборота сдвинуто на 4 дня – время распространения солнечного ветра до Земли. Ось абсцисс – дата (год), ось ординат – скорость солнечного ветра, км/с

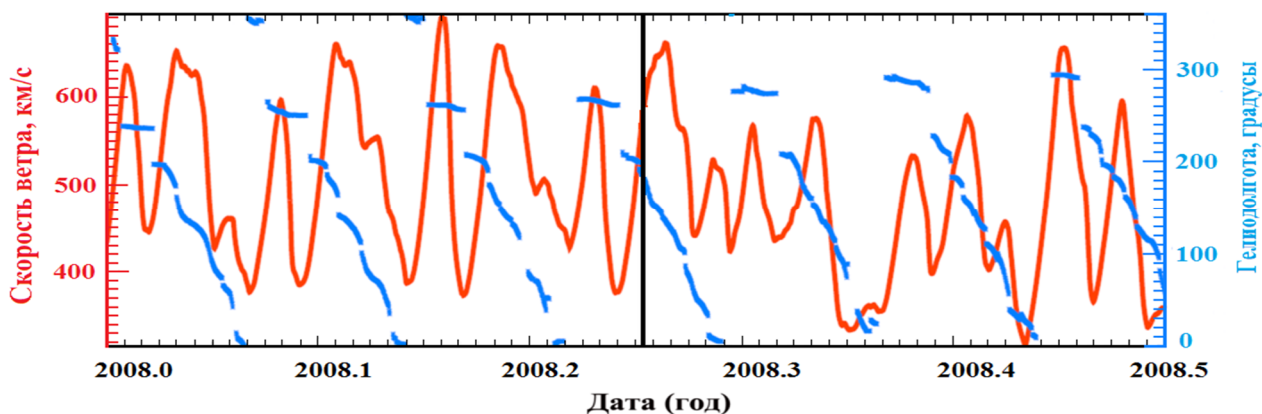


Рис. 3. Динамика скорости солнечного ветра (красная линия) для 7 солнечных оборотов в первой половине 2008 г. [13]. Гелиодолготы (голубая линия) оснований открытых силовых линий межпланетного магнитного поля вблизи солнечного экватора (96-минутные данные)

Динамика корональных дыр в солнечной короне с сентября 2006 г. по июль 2009 г. показана на рис. 1 [11]. Для каждой панели наверху указан номер каррингтонового оборота (CR) Солнца и соответствующий период времени. По оси абсцисс приведена гелиодолгота в градусах, по оси ординат – гелиоширота в градусах. Верхние две панели представляют EUV синоптические карты солнечной короны в линии FeXII 12,5 нм для CR2048 (слева) и CR2055 (справа). Тёмные пятна на рисунках – области низкой эмиссии, области открытых силовых линий (корональные дыры), светлые – активные области. На нижних панелях представлены карты корональных дыр для шести каррингтоновых оборотов, широты 50° и 60° отмечены пунктирными линиями.

Низкоширотные корональные дыры заняли большую часть солнечных долгот вблизи экваториальной зоны $\pm 40^\circ$, в течение 2007 – 2008 гг. их общая площадь мало менялась со временем и в среднем составила порядка 2 – 3% площади поверхности Солнца [10] (рис. 1, панели 2048, CR2055). Долгоживущие корональные дыры определили удивительную сохраняющуюся несколько периодов вращения стабильность структуры солнечной короны в 2006 – 2008 гг. Полярные корональные дыры занимали небольшую часть поверхности Солнца (менее 11%), в основном на высоких (больше 50°) широтах. Низкоширотные корональные дыры явились основным источником высокоскоростных рекуррентных потоков СВ на Земле [4, 12], в 2006 – 2008 гг. потоки СВ со скоростью большей 400 км/с наблюдались в среднем

~ 50% времени [13]. На рис. 2 в качестве примера стабильной рекуррентности приведён временной профиль скорости СВ для 9 солнечных оборотов (первая половина 2008 г.) [12]. В течение всего времени достаточно чётко проявляются 2 – 3 источника высокоскоростных потоков, определяющих 2 – 3-потоковую структуру потоков. Это проявляется как ~ 9, 13,5- и 27-дневная периодичность скорости СВ.

Периодические изменения скорости СВ при вращении источника можно проследить при сопоставлении скорости с изменением долготы и широты оснований силовых линий на Солнце [13, 14]. Такое сопоставление представлено на рис. 3. Рекуррентные периоды ~ 27 и 13 дней наблюдаются при вращении двух источников, расположенных на гелиодолготах ~ 250 – 300° и ~ 120 – 150°.

Структура солнечной короны в 2007 – 2008 гг. менялась мало: площади низкоширотных и полярных дыр сохранялись в течение многих солнечных оборотов. Устойчивая периодическая структура потоков солнечного ветра сохранялась до 2009 г. С середины 2008 г. началась перестройка структуры солнечной короны, происходит постепенная фрагментация низкоширотных корональных дыр (см. рис. 1, панель CR2078).

Следует отметить, что необычная структура солнечной короны в период минимума 2007 – 2009 гг. (возникновение и длительное существование изолированных низкоширотных дыр, малая площадь полярных дыр, большой, > 30°, угол наклона гелиосферного токового слоя) определила особенности структуры потоков СВ. Низкоширотные корональные дыры более двух лет были практически единственными источниками высокоскоростных потоков. В минимуме 23/24 циклов корональные выбросы наблюдались очень редко (~ 28 за пять лет), были очень медленными (средняя скорость составила ~380 км/с), составляли малую долю в общей структуре потоков СВ (в среднем ~2% времени в 2007 – 2009 гг.) и не искажали периодическую структуру потоков СВ [15, 16]. Минимум 23/24 циклов представляет уникальную возможность сопоставить динамику корональных дыр с появлением периодических структур в потоках СВ и выделить соответствующие структуры в магнитосферных параметрах.

Экспериментальные результаты

В работе мы выделяем периодические структуры в потоках СВ, в геомагнитных Dst-и Kp-индексах и в потоках электронов $E_e > 0,6$ МэВ внешнего радиационного пояса для 2006 – 2010 гг.

Мы использовали данные по потокам электронов с энергией $E_e > 0,6$ МэВ, полученные на спут-

нике GOES, с сайта [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/], данные по Dst и Kp индексам взяты с сайтов [<http://www.wdcb.ru/stp/data/geomagni.ind/pc/>] и [<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/wdc/Sec3.html/>], данные по параметрам СВ и межпланетного магнитного поля с сайта [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>].

На рис. 4 представлен временной ряд используемых параметров: скорости солнечного ветра, потока электронов > 0,6 МэВ и Dst- и Kp-индексов. Для сравнения периодических структур исходные данные скорости СВ представлены в виде сглаженных временных рядов (флуктуации с периодами меньше 50 суток удалены), на которые наложены временные ряды флуктуаций с периодами 13,5 и 26 суток. Флуктуации с периодом меньше 20 дней были удалены из временных рядов Kp- и Dst-индексов и потоков электронов. Следует отметить наличие в 2006 – 2008 гг. ярко выраженных периодических структур у всех параметров и близкое подобие общей динамики магнитосферных параметров и скорости СВ. Резкое изменение магнитосферных параметров в конце декабря 2006 г. (увеличение Kp-индекса до 30 и уменьшение Dst-индекса до -45) связано с прохождением ударных волн и магнитных облаков [17]. Источником этих событий явились две западные солнечные вспышки X3.4 (02.38 UT 13 декабря) и X1.5 (22.14 UT 14 декабря). Для анализа использовался следующий набор данных: трёхчасовые значения Kp-индекса, часовые значения Dst-индекса, часовые величины скорости СВ и потоков электронов. На рис. 5. представлены временные распределения скорости СВ. В 2006 – 2008 гг. заметно увеличение числа потоков быстрого СВ, в распределении появляется второй пик в области скоростей ~ 600 км/с. Потоки СВ со скоростью больше 500 км/с наблюдаются более 30% времени. Отметим, что при этом быстрый (>400 км/с) и медленный (< 400 км/с) СВ в общей структуре потоков наблюдаются почти одинаковое время, порядка 50%. Но уже в 2009 г. это соотношение меняется: медленный ветер наблюдается ~ 70% времени и потоки СВ со скоростью больше 500 км/с наблюдаются менее чем в 3% времени. На рис. 6 – 10 приведены расчётные значения спектральной плотности мощности флуктуаций потоков скорости СВ, Kp- и Dst-индексов и потоков электронов $E_e > 0,6$ МэВ для периода 2006 – 2010 гг. Отметим, что на рисунках спектры мощности даны в относительных единицах (нормированная мощность). Нормировки для всех параметров разные, но для каждого параметра постоянны и не меняются в течение 2006 – 2010 гг. При расчётах использовалось преобразование Фурье,

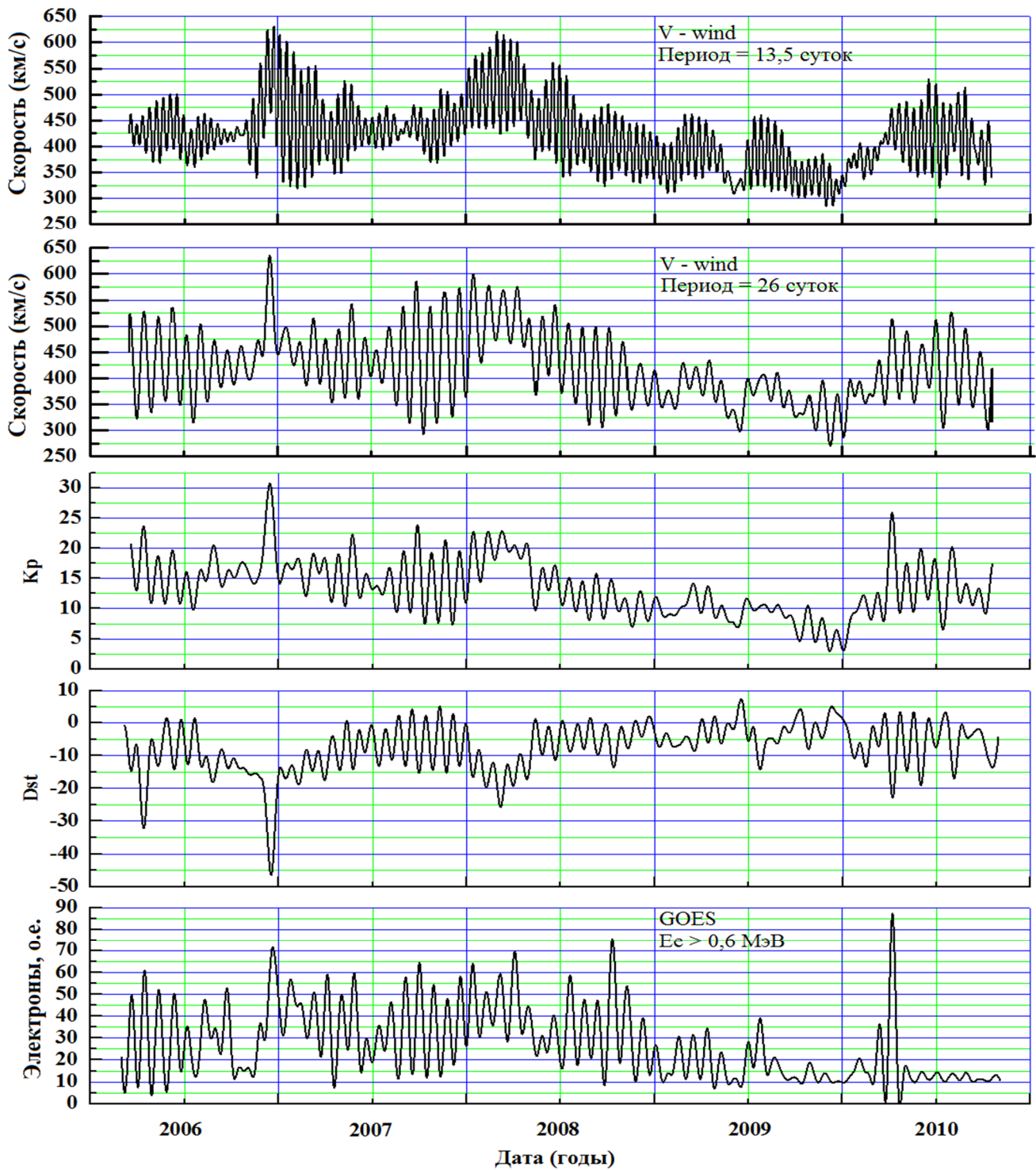


Рис. 4. Динамика скорости солнечного ветра, Dst- и Kp-индексов геомагнитной активности и потока электронов с $E_e > 0,6$ МэВ на геостационарной орбите

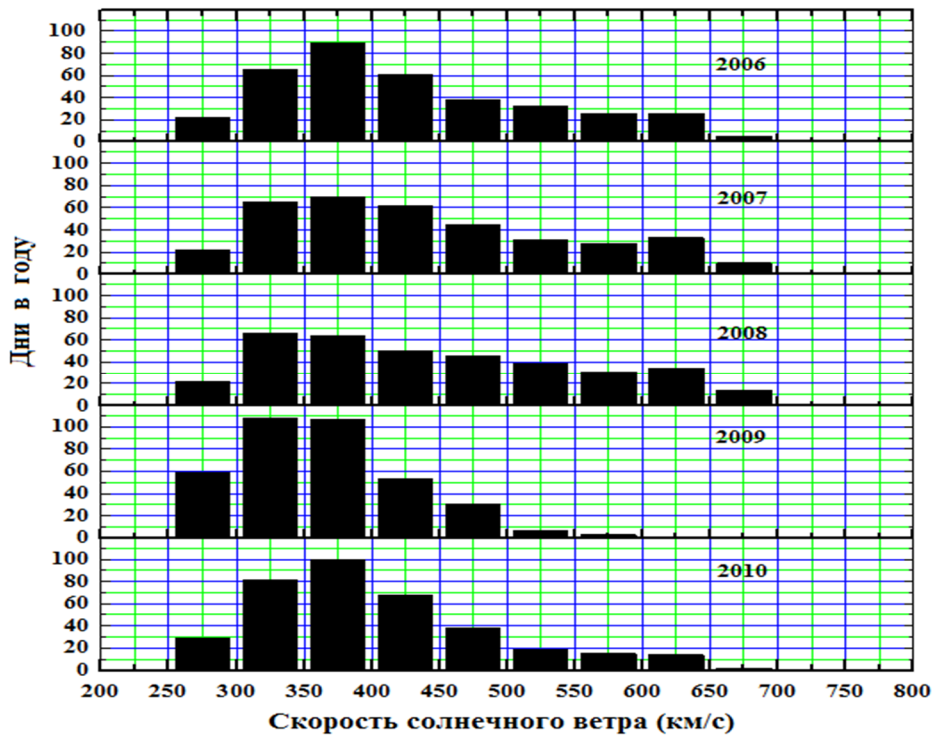


Рис. 5. Гистограмма временного распределения скорости солнечного ветра для 2006 – 2010 гг. По оси ординат отложено число дней в году с данным набором скоростей (шаг гистограммы 50 км/с)

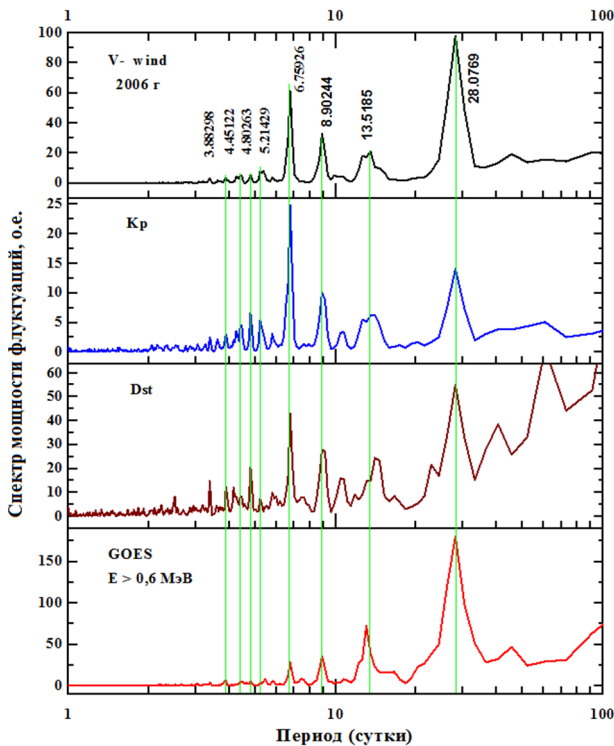


Рис. 6. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и релятивистских электронов на геостационарной орбите по данным 2006 г.

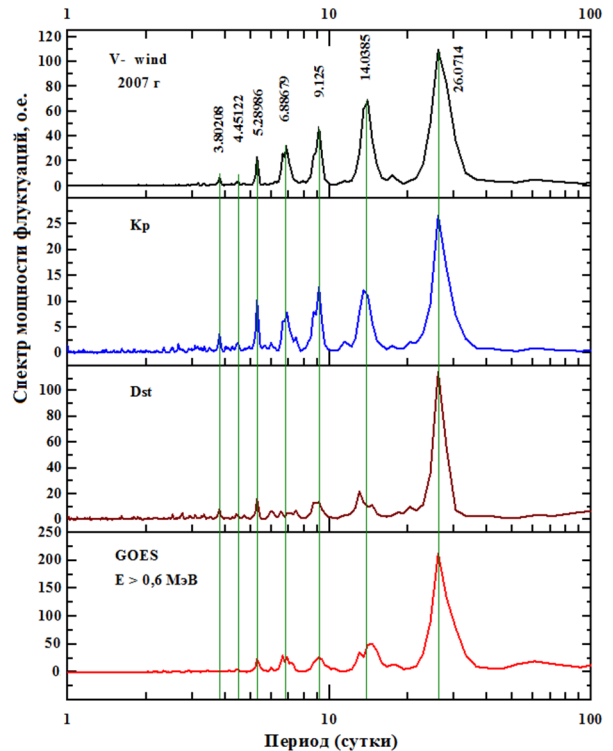


Рис. 7. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и релятивистских электронов на геостационарной орбите по данным 2007 г.

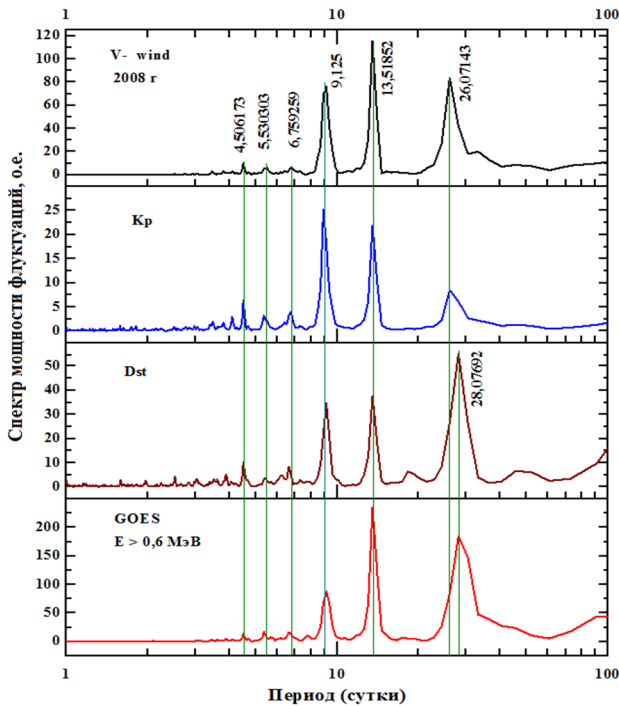


Рис. 8. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и релятивистских электронов на геостационарной орбите по данным 2008 г.

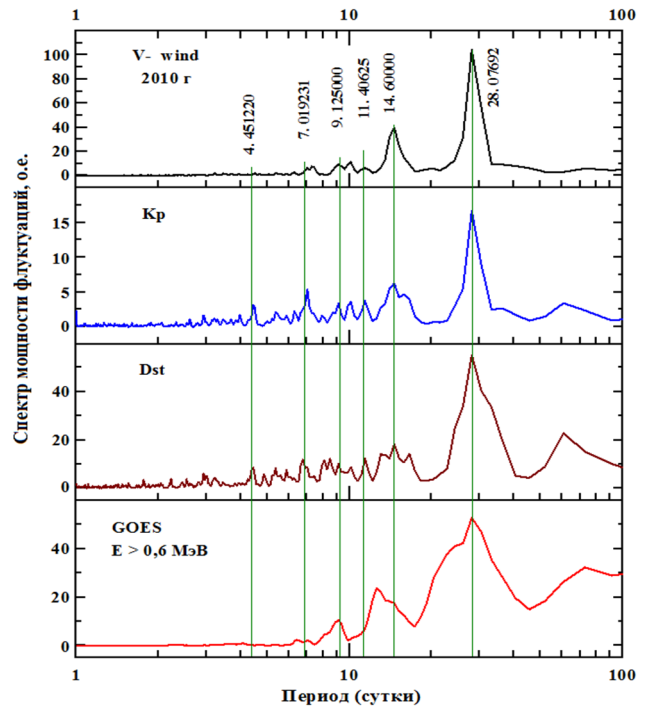


Рис. 10. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и релятивистских электронов на геостационарной орбите по данным 2010 г.

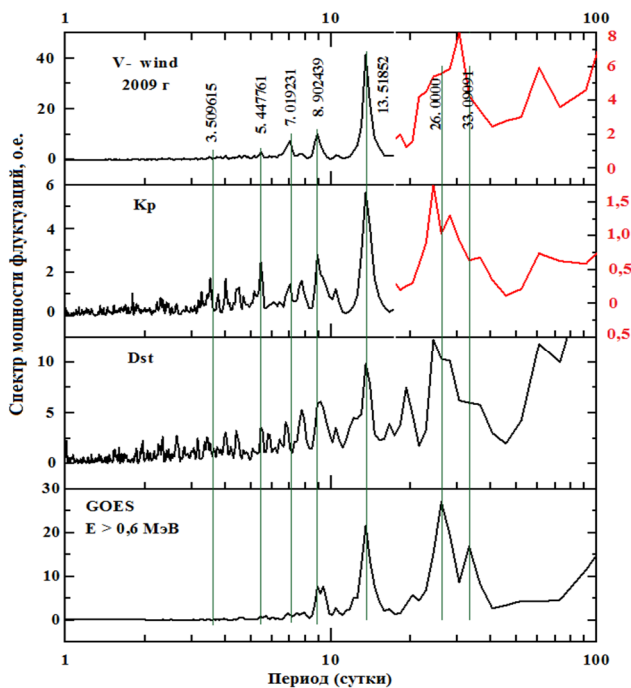


Рис. 9. Спектры мощности флуктуаций скорости солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и релятивистских электронов на геостационарной орбите по данным 2009 г. Для выделения гармоник с периодами более 20 суток на панелях скорости ветра и Kp-индекса дополнительно показаны спектры мощности (красным) в новом масштабе (шкалы справа)

спектр мощности – это квадрат амплитуды флуктуаций в выделенном частотном диапазоне.

На рис. 11 для сравнения приведены спектры мощности 26-дневной (спектральный диапазон 26 – 28 суток) и 13,5-суточной (спектральный диапазон 13,5 – 14 суток) гармоник скорости СВ, потоков электронов и Dst- и Kp-индексов.

Для анализа влияния магнитосферы на формирование периодических структур на рис. 12 для всех параметров представлена динамика отношения мощностей вариаций с периодами 14/27, 9/27 и 9/14 суток. Для построения графика брались пиковые величины мощности вблизи данного периода.

Обсуждение результатов

Далее мы рассмотрим влияние распределения низкоширотных корональных дыр в солнечной короне на формирование периодических структур потоков СВ и отклик магнитосферы на появление высокоскоростных потоков СВ. Отметим, что в структуре потоков СВ в 2006 г. ещё проявляется влияние малой площади среднеширотных корональных дыр, обычно появляющихся на месте старых активных областей на спадающей ветви цикла (см. рис. 1. CR2048). Это отражается в сдвиге основного рекуррентного периода к 28 суткам (см. рис. 6) и по-

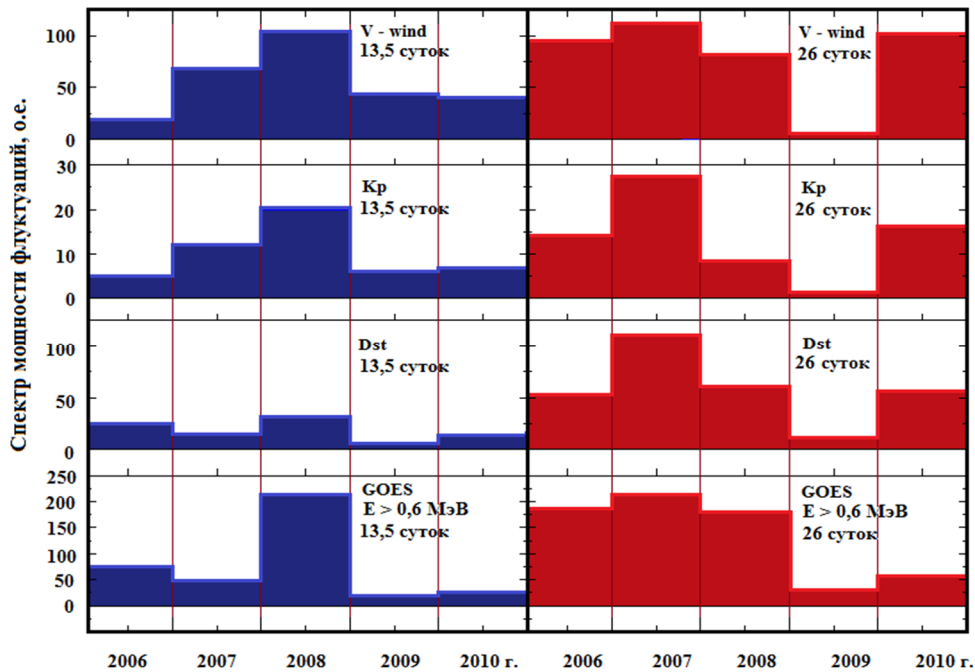


Рис. 11. Распределение спектральной мощности флуктуаций Kp-, Dst-индексов магнитной активности и интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите с периодами 13,5 и 26 суток

явлении нескольких основных периодов ~ 7 , 9 и $13,5$ суток. Отметим значительное усиление мощности вариаций для периода ~ 7 суток в Kp- и Dst-индексах по сравнению с СВ: отношение мощности вариаций 7- и 28-суточных гармоник для СВ $\sim 0,6$, эта величина для Kp $\sim 1,8$, для Dst $\sim 0,8$ (см. рис. 6).

Стабильная картина распределения низкоширотных корональных дыр на поверхности Солнца наблюдалась с конца 2006 г. до середины 2008 г. (рис. 1. CR2055).

В этот период в межпланетном пространстве регистрируются потоки со скоростью более 600 км/с и увеличивается доля (по времени наблюдения потока) высокоскоростных потоков в общей структуре потоков СВ (см. рис. 5). Для потоков со скоростью $V > 500$ км/с она составляет $\sim 30\%$, для потоков с $V > 600$ км/с $\sim 10\%$. В 2007 г. в магнитосфере формируется достаточно устойчивая картина периодических структур Dst- и Kp-индексов и потоков электронов $Ee > 0,6$ МэВ внешнего радиационного пояса. Периоды ~ 26 дней регистрируются у всех параметров, а более короткие периоды порядка 14 , 9 и 7 суток зарегистрированы только у Kp-индекса и почти не проявляются в Dst-индексе и потоках частиц (см. рис. 7). Отме-

тим, что в это время основная спектральная мощность сосредоточена в 26-суточных вариациях (см. рис. 11), для всех магнитосферных параметров отношение мощности вариаций с периодами ~ 14 суток к мощности ~ 26 -суточных вариаций меньше, чем в СВ, равным $\sim 0,6$ (рис. 12). Среднее значение интенсивности потока релятивистских электронов ($Ee > 0,6$ МэВ) за 2007 г. увеличилось в несколько раз и составляло величину $\sim 2,6 \cdot 10^{10}$ / (см²·сутки·стер). Очень интересна реакция потоков СВ и магнитосферных параметров на изменение структуры короны в конце 2008 г. (см. рис. 8). К концу 2008 г. две наиболее большие корональные дыры, которые явились источниками потоков СВ с $V > 500$ км/с, заметно уменьшились (см. рис. 1. CR2075). В середине 2008 г. появляется новый источник – корональная дыра в южной полусфере на более высоких широтах (см. рис. 1, CR 2068) [9, 10]. Такая перестройка структуры солнечной короны приводит к изменению периодической структуры потоков СВ, Dst- и Kp-индексов и потоков электронов: уменьшается спектральная плотность мощности для 26-суточной гармоники и значительно увеличивается мощность 13- и 9-суточных гармоник (см. рис. 12). Отношение мощности 13,5- и 26-суточных вариаций для

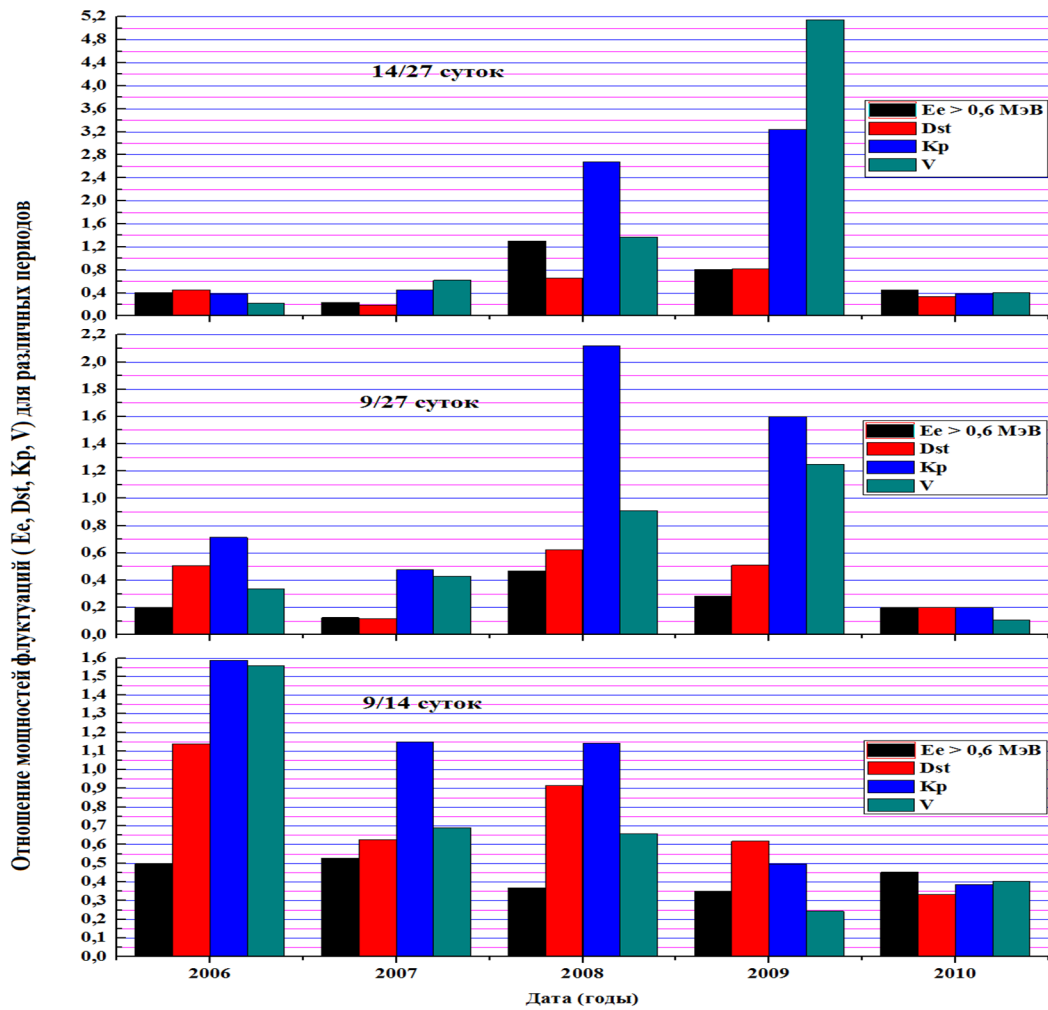


Рис. 12. Динамика отношений мощности вариаций с периодами 14/27 суток, 9/27 суток и 9/14 суток в 2006 – 2010 гг.

потоков СВ и электронов $\sim 1,3$, для Кр-индекса – больше 2,5 (см. рис. 11).

В 2009 г. происходит полная перестройка структуры солнечной короны: низко- и среднеширотные корональные дыры почти исчезают (см. рис. 1, CR2078, CR2085). Потоки СВ с $V > 500$ км/с наблюдаются менее 3% времени. Средняя скорость СВ достигла минимальной величины 364 км/с. С середины 2009 г. начинается постепенное повышение активности 24 цикла: появляются несколько малых среднеширотных короткоживущих корональных дыр, их общая площадь менее 1,5% поверхности Солнца. Долготно-широтная перестройка солнечной короны проявилась в изменении периодической структуры всех параметров (см. рис. 9). Появление в периодической структуре кроме основного 26-суточного периода дополнительной 33-суточной гармоники отражает влияние полярной корональной дыры. Спектральная плотность

мощности всех гармоник значительно снизилась (см. рис. 11), но при этом изменилось соотношение мощности 13,5- и 26-суточных гармоник: для СВ эта величина составила более 5, для Кр-индекса ~ 3 , для электронов и Dst-индекса $\sim 0,8$ (см. рис. 12). В 2009 г. средний поток электронов внешнего радиационного пояса уменьшается до $6,7 \cdot 10^9 / (\text{см}^2 \cdot \text{сутки} \cdot \text{стер})$.

В 2010 г. в связи с ростом солнечной активности продолжается перестройка структуры солнечной короны, появляется несколько активных областей на средних широтах, в межпланетном пространстве увеличивается число корональных выбросов массы [12]. Источники СВ смещаются к средним широтам. Это проявляется и в смещении периода основной гармоники к 28 суткам (см. рис. 10). Распределение мощности между 14/27, 9/27 и 9/14 гармониками для магнитосферных параметров близко к значениям в СВ (см. рис. 12). Средняя ско-

рость СВ увеличивается до 440 км/с (в основном за счёт корональных выбросов), потоки СВ с $V > 500$ км/с наблюдаются менее 14% времени. Средняя (усреднённая за год) интенсивность потока электронов $E_e > 0,6$ МэВ в 2010 г достигла минимальной величины $\sim 5 \cdot 10^9 / (\text{см}^2 \cdot \text{сутки} \cdot \text{стер})$.

Проведённый анализ периодических структур показал связь распределения мощности среди гармоник периодической структуры высокоскоростных потоков СВ с долготно-широтной динамикой корональных дыр. Сдвиг основной рекуррентной 26-суточной гармоник в 2009 г. и 2010 г. к 28 и 33 суткам связан с появлением среднеширотных корональных дыр, снижением гелиошироты нижнего края полярной корональной дыры. Найдено уменьшение \sim в 15 раз спектральной плотности мощности 26-суточной гармоник в потоках медленного СВ (2009 г.) по сравнению с мощностью в рекуррентных высокоскоростных потоках (2007 г.) и спад мощности для 14 (\sim в 2 раза) и 9 (\sim в 5 раз) суточных гармоник (см. рис. 11 и 12). Обнаружено значительное различие в отклике магнитосферных параметров на изменение периодической структуры потоков СВ. В 2009 г. по сравнению с 2007 г. уменьшаются мощности всех гармоник магнитосферных параметров: мощность 26-суточной гармоник уменьшается \sim в 15 раз для Кр-индекса, в \sim 10 раз для Dst-индекса и электронов, мощности 14- и 9-суточных гармоник у всех параметров уменьшаются \sim в 3 раза. Обнаружены значительные изменения в распределении мощности среди гармоник в периодических структурах всех параметров при изменении гелиошироты источников (появлении среднеширотных корональных дыр и изменении угла наклона гелиосферного токового слоя – середина 2008 – 2009 гг.). При общем уменьшении мощности всех гармоник в 2009 г. найдено значительное усиление мощности 14- и 9-суточных гармоник по сравнению с 26-суточной гармоникой. Как было показано, 2009 – 2010 гг. характеризуются почти полным исчезновением низкоширотных корональных дыр (см. рис. 1) и высокоскоростных потоков, потоки СВ с $V > 500$ км/с наблюдаются менее 3% времени (рис. 5). В 2009 – 2010 гг. зарегистрировано значительное, более 70%, падение интенсивности потока релятивистских электронов ВРПЗ (см. рис. 4), что указывает на низкую геоэффективность потоков СВ в этот период. В 2009 г. зарегистрированы чрезвычайно низкие среднегодовые значения индексов геомагнитной активности (Dst = -2,9 и Кр = 8,99). В [18] отмечается, что при низкой геомагнитной активности могут отсутствовать источники для фор-

мирования дополнительных потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ).

Интересно сопоставить динамику общей площади источников открытых силовых линий и изменение угла наклона гелиосферного токового слоя с динамикой периодических структур в солнечном ветре. На рис. 13, а для периода июль 2007 г. – июнь 2010 г. представлен угол наклона гелиосферного токового слоя; на рис. 13, б показана динамика общей площади источников оснований силовых линий открытых магнитных структур (динамика общей площади низкоширотных корональных дыр) [13, 14]. Для сравнения там же представлен временной профиль 26-дневных вариаций скорости солнечного ветра. На рис. 13, в представлен сглаженный (вариации с периодами меньше 50 суток удалены) временной ряд скорости СВ. На рис. 13, г показана динамика интенсивности потока релятивистских электронов с энергией $E_e > 0,6$ МэВ на геостационарной орбите. Следует отметить, что вычисленная динамика общей площади источников открытых силовых линий отражает гелиоширотную динамику корональных дыр как источников СВ. Действительно, как было показано, до середины 2008 г. основным источником высокоскоростных потоков СВ явились низкоширотные корональные дыры, суммарная площадь которых сохранялась в течение \sim одного года. Для этого периода найдена почти 100% корреляция 26-суточных вариаций полной площади низкоширотных корональных дыр и 26-суточных вариаций скорости СВ (рис. 13, б). В 2009 г. наблюдается фрагментация низкоширотных корональных дыр, их площадь вблизи экваториальной зоны уменьшается (рис. 1, панель CR2078), источники СВ сдвигаются к средним широтам и к нижнему краю полярной корональной дыры. При этом значительно уменьшается амплитуда 26-суточных вариаций. Снижение угла наклона гелиосферного токового слоя в 2009 г. с 25 до \sim 10 градусов (см. рис. 13, а) сопровождалось значительным усилением мощности 13,5-дневной гармоник (см. рис. 12). Сопоставление динамики общей площади низкоширотных корональных дыр с динамикой скорости СВ (см. рис. 13, б и в) показывает близкое подобие временных профилей этих величин в 2007 – 2009 гг.: уменьшение площади сопровождается уменьшением скорости СВ и уменьшением интенсивности потока релятивистских электронов ВРПЗ. Дозовые нагрузки во внешнем радиационном поясе формируются потоками электронов и отражают динамику высокоскоростных потоков СВ. На рис. 14 для 2006 – 2010 гг. представлены графики накопленной

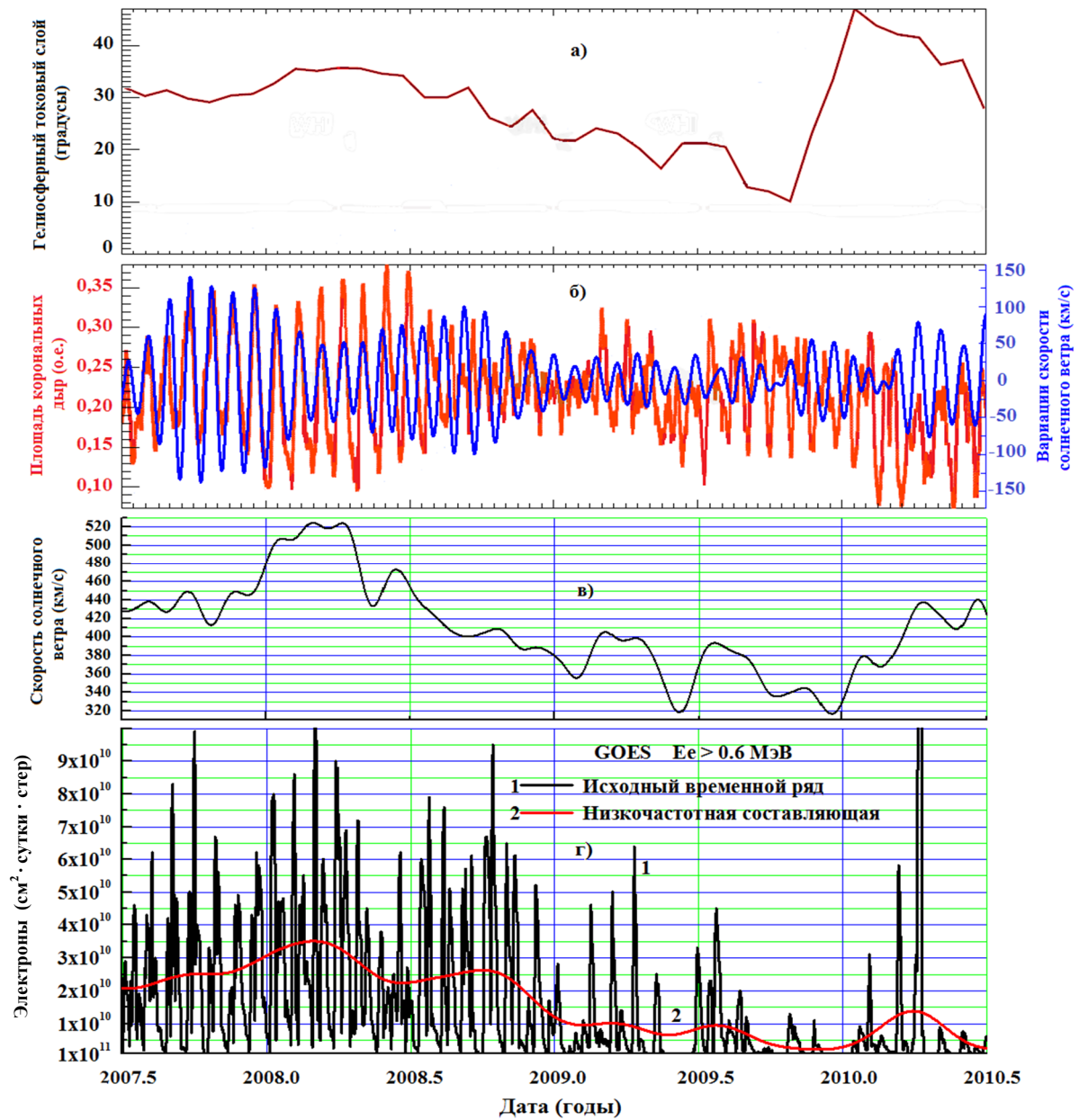


Рис. 13. Для периода с 2007 по 2010 гг. показаны: *a* – динамика гелиосферного токового слоя [13]; *б* – периодические вариации площади корональных дыр (красная кривая) [13, 14] и флуктуаций скорости солнечного ветра с периодом 26 суток (синяя кривая); *в* – временной ряд скорости СВ (вариации с периодами меньше 50 суток удалены); *г* – динамика интенсивности потока релятивистских электронов с $E_e > 0,6 \text{ МэВ}$ на геостационарной орбите

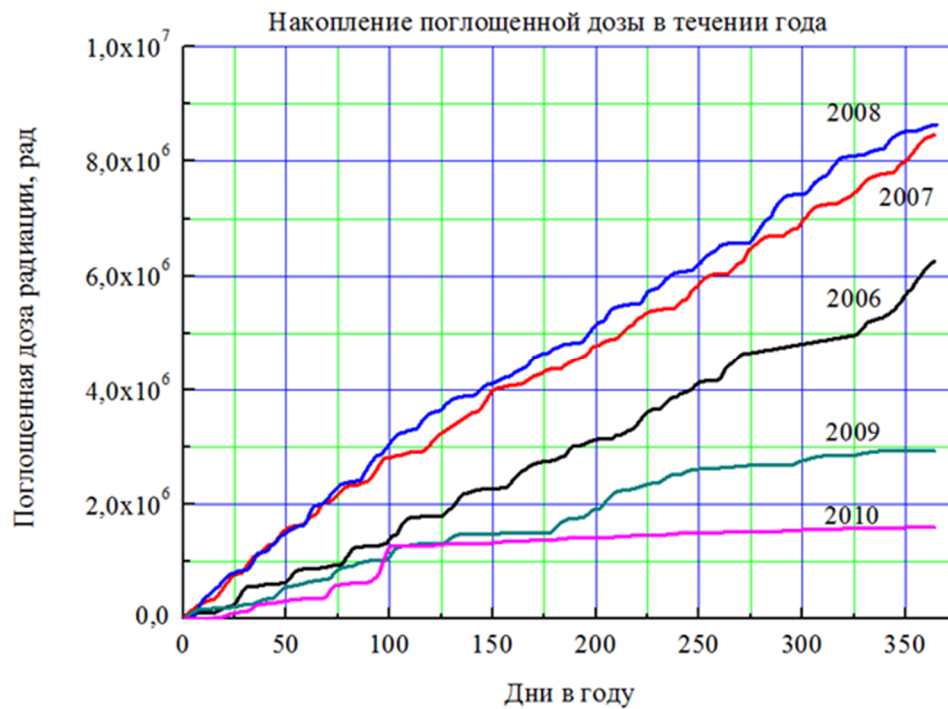


Рис. 14. Накопленная поглощённая доза радиации от электронов внутри сферы из алюминия толщиной 0,8 мм по данным прямых измерений потоков электронов на ГСО за 2006 – 2010 гг.

в течение года под экраном 0,8 мм Al поглощённой дозы. Уменьшение ~ в 3 раза накопленной в 2009 г. дозы относительно дозовых нагрузок 2007 – 2008 гг. связано с почти полным исчезновением высокоскоростных потоков в 2009 г.

В отличие от радиационной обстановки во ВРПЗ рассмотренные выше особенности структуры потоков СВ в 2009 – 2010 гг. (экстремально низкие величины напряжённости межпланетного магнитного поля, скорости СВ и динамического давления) привели к увеличению радиационного фона в межпланетном пространстве. В 2009 – 2010 гг. в межпланетном пространстве было зарегистрировано увеличение на ~ 20% потока галактических космических лучей с энергией нескольких сотен МэВ/нуклон, что соответствует увеличению радиационной дозы ~ на 14% [19].

Выводы

В работе проведён анализ динамики распределения мощности среди гармоник периодической структуры высокоскоростных потоков СВ и показана связь динамики периодических структур с динамикой корональных дыр и гелиосферного токового слоя для минимума СА 2007 – 2009 гг. Спектральная плотность мощности флуктуаций вычис-

лена для всех параметров (скорости СВ, интенсивности потоков электронов с энергией $E_e > 0,6$ МэВ ВРПЗ и геомагнитных индексов). В периодической структуре СВ найдено увеличение спектральной плотности мощности для 26 (~ в 15 раз), для 14 (~ в 2 раза) и для 9 (~ в 5 раз) суточных гармоник в рекуррентных высокоскоростных потоках по сравнению с медленным ветром. Обнаружено значительное различие в отклике магнитосферных параметров на изменение периодической структуры потоков СВ. Показано влияние гелиошироты источников СВ на периодическую структуру СВ и магнитосферных параметров. Возникновение в 2008 г. и в 2009 г. 28- и 33-суточных гармоник и значительное усиление мощности 13- и 9-суточных гармоник связано с появлением среднеширотных корональных дыр и уменьшением угла наклона гелиосферного токового слоя (с 30 до 20° в 2008 г.). Показано, что при уменьшении угла наклона наиболее значительные изменения в распределении мощности зарегистрированы у магнитосферных параметров. В 2008 г. по сравнению с 2007 г. найдено увеличение отношения мощностей 13,5- и 27-суточных гармоник ~ в 2 раза для СВ, ~ в 3 раза для Кр-индекса и ~ в 5 раз для электронов. Анализ динамики высокоскоростных потоков СВ, Кр-

и Dst-индексов показал, что падение $\sim 70\%$ интенсивности потоков релятивистских электронов ВРПЗ в 2009 – 2010 гг. связано с почти полным исчезновением высокоскоростных потоков и их низкой геоэффективностью. Проведено сопоставление динамики общей площади низкоширотных корональных дыр с динамикой скорости СВ и интенсивности потока релятивистских электронов на геостационарной орбите, показано близкое подобие временных профилей этих величин в 2007 – 2009 гг.: уменьшение площади сопровождается уменьшением скорости СВ и уменьшением интенсивности релятивистских электронов. Для этого периода обнаружена почти 100% корреляция 26-дневных вариаций полной площади низкоширотных корональных дыр и 26-дневных вариаций скорости СВ. В работе проведены расчёты накопленной в течение года под экраном 0,8 мм Al поглощённой дозы радиации. Уменьшение в ~ 3 раза накопленной в 2009 г. дозы относительно дозовых нагрузок 2007 – 2008 гг. связано с почти полным исчезновением высокоскоростных потоков СВ в 2009 г.

Литература

1. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review / B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, A.L.C. Gonzalez, F. L. Guarnieri, N. Gopalswamy, M. Grande, Y. Kamide, Y. Kasahara, G. Lu, I. Mann, R. McPherron, F. Soraas, and V. Vasylunas // *Journal of geophysical research: Space Phys.* – 2006. – Vol. 111, A07S01. – P. 1 – 25.
2. Geospace environment modeling 2008–2009 challenge: Dst index / L. Rasttatter, M. M. Kuznetsova, A. Glocer, D. Welling, X. Meng, J. Raeder, M. Wiltberger, V. K. Jordanova, Y. Yu, S. Zaharia, R. S. Weigel, S. Sazykin, R. Boynton, H. Wei, V. Eccles, W. Horton, M. L. Mays, and J. Gannon // *Space weather.* – 2013. – Vol. 11. – P. 187 – 205.
3. The Kp index and solar wind speed relationship: Insights for improving space weather forecasts / H. A. Elliott, J.-M. Jahn, and D. J. McComas // *Space weather.* – 2013. – Vol. 11. – P. 339 – 349.
4. Solar Rotational Periodicities and the Semiannual Variation in the Solar Wind, Radiation Belt, and Aurora / B. A. Emery, I. G. Richardson, D. S. Evans, F. J. Rich, G. R. Wilson // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 399 – 425.
5. 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. – № 4. – С. 639 – 641.
6. Эволюция потоков энергичных электронов на геостационарной орбите в 22-м и 23-м циклах солнечной активности. 27-дневные вариации / В. И. Дегтярёв, С. Э. Чудненко // *Солнечно-земная физика.* – 2010. – Вып. 16. – С. 118 – 123.
7. Ionospheric Day-to-Day Variability Around the Whole Heliosphere Interval in 2008 / W. Wang, J. Lei, A. G. Burns, L. Qian, S. C. Solomon, M. Wiltberger, J. Xu // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 457 – 472.
8. Impact of CIR Storms on Thermosphere Density Variability during the Solar Minimum of 2008 / J. Lei, J. P. Thayer, W. Wang, R. L. McPherron // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 427 – 437.
9. Comparing Solar Minimum 23/24 with Historical Solar Wind Records at 1 AU / L. K. Jian, C. T. Russell, J. G. Luhmann // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 321 – 344.
10. Low-latitude coronal holes at the minimum of the 23rd solar cycle / V. Abramenko, V. Yurchyshyn, J. Linker, Z. Mikić, J. Luhmann, and Ch. O. Lee // *The Astrophysical J.*, 712. – 2010. – P. 813 – 818.
11. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24/ G. de Toma // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 195 – 217.
12. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals/ S. E. Gibson, J.U. Kozyra, G.de Toma, B. A. Emery, T. Onsager, and B. J. Thompson // *Journal of geophysical research: Space Phys.* – 2009. – Vol. 114, A09105. – P. 1 – 7.
13. The Whole Heliosphere Interval in the Context of a Long and Structured Solar Minimum: An Overview from Sun to Earth/ S. E. Gibson, G. de Toma, B. Emery, P. Riley, L. Zhao, Y. Elsworth, R. J. Leamon, J. Lei, S. McIntosh, R. A. Mewald, B. J. Thompson, D. Webb // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 5 – 27.
14. How the solar wind ties to its photospheric origins/ R.J. Leamon, S.W. McIntosh // *Astrophys. J. Lett.*, 697, 2009. – L28 – L32.
15. The Floor in the Solar Wind Magnetic Field / E.W. Cliver, A.G. Ling // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 285 – 301.
16. Magnetic Clouds at/near the 2007 – 2009 Solar Minimum: Frequency of Occurrence and Some Unusual Properties / R. P. Lepping, C.-C. Wu, D. B. Berdichevsky, A. Szabo // *Solar Phys.*, 274. – 2011. – P. 345 – 360.
17. A Comprehensive view of the 2006 december 13 CME: From the Sun to interplanetary space / Y. Liu, J. G. Luhmann, R. Muller-Mellin, P. C. Schroeder, L. Wang, R. P. Lin, S. D. Bale, Y. Li, M. H. Acuna, and J.-A. Sauvaud // *The Astrophysical J.*, 689. – 2008. – P. 563 – 571.
18. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? / R. Kataoka and Y. Miyoshi // *Space weather.* – 2010. – Vol. 8, S08002. – P. 1 – 6.
19. Record-setting cosmic-ray intensities in 2009 and 2010 / R. A. Mewaldt, A. J. Davis, K. A. Lave, R. A. Leske, E. C. Stone, M. E. Wiedenbeck, W. R. Binns, E. R. Christian, A. C. Cummings, G. A. de Nolfo, M. H. Israel, A. W. Labrador, and T. T. von Rosenvinge // *The Astrophysical J. Lett.*, 723. – 2010. – L1 – L6.

Поступила в редакцию 9.12.2014

Иннокентий Петрович Безродных, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
ИКИ РАН, т. (495) 333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Евгения Ивановна Морозова, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник,
ИКИ РАН, т. (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

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

Мария Николаевна Будяк, научный сотрудник,
т. (495) 366-38-38, e-mail: taboudiak@mail.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Владимир Тимофеевич Семёнов, начальник лаборатории, т. (495) 366-38-38,
e-mail: vniiem@vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

GENERATION OF PERIODIC STRUCTURES IN THE SOLAR-WIND FLUX OF EARTH'S MAGNETOSPHERE DURING THE MINIMAL SOLAR ACTIVITY PERIOD IN 2006 – 2010

I.P. Bezrodnyh, E.I. Morozova, A.A. Petrukovich,
M.N. Budiak, V.T. Semenov

A connection is being revised between the periodic structure of the solar-wind flux and the coronal holes' dynamics during the minimal solar activity period in 2006 – 2010, while another revised issue was the generation of periodic structures in the relativistic electron flows of the Earth's outer radiation belt, as well as in the geomagnetical parameters Dst- and Kp-indexes. The spectral density of fluctuation power has been calculated for all parameters (solar-wind velocity, flow of electrons (electrojet) with $E_e > 0,6$ MeV as well as the geomagnetical indexes). Power distribution analysis has been performed regarding the periodic structure harmonics of the solar wind high-speed stream. It has been indicated that in 2006 – 2007 the major sources of a 26-day recurrent harmonics in the solar-wind fluxes were the long-lived low-latitude coronal holes, while the occurrence of the 28- and 33-day harmonics is related to the appearance of the mid-latitude coronal holes. A major difference has been discovered in the magnetosphere parameters' response to the periodic structure changes in the solar-wind flux. For all parameters (Kp, Dst and the electrojet flux rate $E_e > 0,6$ MeV) the periodical structure dynamics has been compared to the dynamics of the recurrent solar wind high-speed streams (2007 – 2008) and of the solar wind low-speed streams (2009). An increase (by the rate of 10 – 15 times) has been detected in the acceleration spectral density of a 26-day harmonic in the recurrent solar wind high-speed streams comparing to the low-speed solar wind streams. Significant changes have been detected in the harmonics' power distribution in the periodic structures of all parameters, when changing the sources' heliolatitude (occurrence of the mid-latitude coronal holes as well as the changes in the angular inclination of the heliosphere current sheath – midyear of 2008 – 2009). A comparison has been made between the gross area of the low-latitude coronal holes and the dynamics of the solar-wind velocity. Close similarity has been demonstrated between the temporal profiles of those values in 2007 – 2009. Reduction of the gross-area is followed by the solar-wind deceleration as well as the relativistic electron flux reduction. During that period – almost 100% correlation has been detected between the 26-day variation of low-latitude gross-area of the coronal holes and the 26-day variation of the solar-wind velocity. For the years 2006 – 2010 – yearly collected radiation doses in Earth's outer radiation belt have been calculated.

Key words: Coronal holes, solar wind high-speed stream, periodic structures, geomagnetic activity indexes, outer radiation belt, relativistic electrons, radiation absorbed dose.

References

1. Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review / B. T. Tsurutani, W. D. Gonzalez, A.L.C. Gonzalez, F. L. Guarnieri, N. Gopalswamy, M. Grande, Y. Kamide, Y. Kasahara, G. Lu, I. Mann, R. McPherron, F. Soraas, and V. Vasyliunas // Journal of geophysical research: Space Phys. – 2006. – Vol. 111, A07S01. – P. 1 – 25.
2. Geospace environment modeling 2008–2009 challenge: Dst index / L. Rastdttter, M. M. Kuznetsova, A. Glocer, D. Welling, X. Meng, J. Raeder, M. Wiltberger, V. K. Jordanova, Y. Yu, S. Zaharia, R. S. Weigel, S. Sazykin, R. Boynton, H. Wei, V. Eccles, W. Horton, M. L. Mays, and J. Gannon // Space weather. – 2013. – Vol. 11. – P. 187 – 205.
3. The Kp index and solar wind speed relationship: Insights for improving space weather forecasts / H. A. Elliott, J.-M. Jahn, and D. J. McComas // Space weather. – 2013. – Vol. 11. – P. 339 – 349.
4. Solar Rotational Periodicities and the Semiannual Variation in the Solar Wind, Radiation Belt, and Aurora / B. A. Emery, I. G. Richardson, D. S. Evans, F. J. Rich, G. R. Wilson // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 399 – 425.

5. Regarding the connection between the long-periodic electron variations in Earth's outer radiation belt and the solar-wind parameters / I. P. Bezrodnyh, I. U. G. Shafer // Cosmic exploration. – 1982. – Т. 20. – N 4 – p. 639 – 641.
6. Evolution of the energetic electrons flux on geostationary orbit in the 22-nd and 23-rd cycles of the solar activity. 27-day variations / V. I. Degtiarev, S. E. Chudnenko // Solar-terrestrial physics. – 2010. – Issue 16. – p. 118 – 123.
7. Ionospheric Day-to-Day Variability Around the Whole Heliosphere Interval in 2008 / W. Wang, J. Lei, A. G. Burns, L. Qian, S. C. Solomon, M. Wiltberger, J. Xu // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 457–472.
8. Impact of CIR Storms on Thermosphere Density Variability during the Solar Minimum of 2008 / J. Lei, J. P. Thayer, W. Wang, R. L. McPherron // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 427–437.
9. Comparing Solar Minimum 23/24 with Historical Solar Wind Records at 1 AU / L. K. Jian, C. T. Russell, J. G. Luhmann // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 321 – 344.
10. Low-latitude coronal holes at the minimum of the 23rd solar cycle / V. Abramenko, V. Yurchyshyn, J. Linker, Z. Mikić, J. Luhmann, and Ch. O. Lee // The Astrophysical J., 712. – 2010. – P. 813 – 818.
11. Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24/ G. de Toma // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 195 – 217.
12. If the Sun is so quiet, why is the Earth ringing? A comparison of two solar minimum intervals/ S. E. Gibson, J. U. Kozyra, G. de Toma, B. A. Emery, T. Onsager, and B. J. Thompson // Journal of geophysical research: Space Phys. – 2009. – Vol. 114, A09105. – P. 1 – 7.
13. The Whole Heliosphere Interval in the Context of a Long and Structured Solar Minimum: An Overview from Sun to Earth/ S. E. Gibson, G. de Toma, B. Emery, P. Riley, L. Zhao, Y. Elsworth, R. J. Leamon, J. Lei, S. McIntosh, R. A. Mewaldt, B. J. Thompson, D. Webb // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 5 – 27.
14. How the solar wind ties to its photospheric origins/ R.J. Leamon, S.W. McIntosh // Astrophys. J. Lett., 697, 2009. – L28 – L32.
15. The Floor in the Solar Wind Magnetic Field / E.W. Cliver, A.G. Ling // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 285 – 301.
16. Magnetic Clouds at/near the 2007 – 2009 Solar Minimum: Frequency of Occurrence and Some Unusual Properties / R. P. Lepping, C.-C. Wu, D. B. Berdichevsky, A. Szabo // Solar Phys., 274. – 2011. – P. 345 – 360.
17. A Comprehensive view of the 2006 december 13 CME: From the Sun to interplanetary space / Y. Liu, J. G. Luhmann, R. Muller-Mellin, P.C. Schroeder, L. Wang, R. P. Lin, S. D. Bale, Y. Li, M. H. Acuna, and J.-A. Sauvaud // The Astrophysical J., 689. – 2008. – P. 563 – 571.
18. Why are relativistic electrons persistently quiet at geosynchronous orbit in 2009? / R. Kataoka and Y. Miyoshi // Space weather. – 2010. – Vol. 8, S08002. – P. 1 – 6.
19. Record-setting cosmic-ray intensities in 2009 and 2010 / R. A. Mewaldt, A. J. Davis, K. A. Lave, R. A. Leske, E. C. Stone, M. E. Wiedenbeck, W. R. Binns, E. R. Christian, A. C. Cummings, G. A. de Nolfo, M. H. Israel, A. W. Labrador, and T. T. von Rosenvinge // The Astrophysical J. Lett., 723. – 2010. – L1 – L6.

Innokentiy Petrovich Bezrodnyh, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, senior research associate,
IKI RAN, tel.: (495) 333-38-38, e-mail: d54x@mail.ru.

Evgenia Ivanovna Morozova, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, senior research associate,
IKI RAN, tel.: (495) 333-20-00, e-mail: morozova.evgeniya2014@yandex.ru.

Anatoliy Alekseevich Petrukovich, corresponding member of RAN, Deputy Director of IKI RAN,
tel.: (495) 333-32-67, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru.

Maria Nikolaevna Budiak, research associate,
tel.: (495) 366-38-38, e-mail: maboudiak@mail.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).

Vladimir Timofeevich Semenov, Head of Laboratory, tel.: (495) 366-38-38,
e-mail: vniiem@vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).