

УДК 550.385.41

СВЯЗЬ МЕЖДУ ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ И УВЕЛИЧЕНИЕМ ПОТОКОВ ГЕОСИНХРОННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

¹В.И. Дегтярев, ¹И.П. Харченко, ¹А.С. Потапов, ^{1,2}Б. Цэгмэд, ¹С.Э. Чудненко

RELATION BETWEEN GEOMAGNETIC PULSATIONS AND INCREASE IN GEOSYNCHRONOUS RELATIVISTIC ELECTRON FLUXES DURING GEOMAGNETIC STORMS

¹V.I. Degtyarev, ¹I.P. Kharchenko, ¹A.S. Potapov, ^{1,2}B. Tsegmed, ¹S.E. Chudnenko

Для трех девятисуточных интервалов, включающих спокойные периоды и периоды геомагнитных бурь, проведен сравнительный анализ динамики характеристик пульсаций типов Pc5 и Pi1 и потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите. Показано, что значительное увеличение потоков релятивистских электронов происходит при одновременном увеличении мощности глобальных пульсаций Pc5 и индекса среднеширотных иррегулярных пульсаций Pi1. Исследованы коррелятивные связи характеристик геомагнитных пульсаций типов Pi1 и Pc5 с уровнем потока релятивистских электронов на геостационарной орбите на восстановительной фазе магнитных бурь. Показано, что коэффициент корреляции максимальных потоков релятивистских электронов на восстановительной фазе магнитной бури с параметром среднеширотных пульсаций Pi1 несколько выше, чем со скоростью солнечного ветра.

We performed a comparative analysis of dynamics of Pc5 and Pi1 characteristics and relativistic electron fluxes at the geostationary orbit for three 9-day intervals comprising quiet periods and geomagnetic storms. The increase in relativistic electron fluxes was shown to be accompanied with simultaneous increase in power of global Pc5 pulsations and in index of mid-latitude irregular Pi1 pulsations. We studied correlative relationships between the characteristics of Pi1 and Pc5 geomagnetic pulsations and the level of relativistic electron flux at the geostationary orbit during the recovery phase of magnetic storms. The correlation coefficient of peak relativistic-electron fluxes during the recovery phase was shown to be somewhat higher with parameter of mid-latitude Pi1 pulsations than with the solar wind velocity

Введение

Во время геомагнитных бурь на их восстановительной фазе во внешнем радиационном поясе часто регистрируются потоки релятивистских электронов, значительно превышающие уровень потоков электронов перед началом бури. Эти увеличенные потоки релятивистских электронов могут стать причиной серьезных нарушений в работе систем космических аппаратов, чьи орбиты пересекают область внешнего радиационного пояса [Wrenn, et al., 2002]. С целью предотвращения этих нежелательных явлений и расчета радиационных доз, воздействующих на спутники, разрабатываются эмпирические модели прогноза радиационной обстановки на орбитах космических аппаратов (см., например, [Панасюк, 1989; Fung, 2004]). В качестве входных параметров таких моделей используются в основном параметры солнечного ветра и индексы геомагнитной активности. Однако в периоды геомагнитных бурь, особенно в восстановительную фазу, можно отметить большие расхождения между прогнозируемыми и наблюдаемыми величинами потоков релятивистских электронов. В [Barker, et al., 2005] сделан вывод, что для большей эффективности прогнозирования потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе необходимо учитывать индивидуальные особенности геомагнитных бурь. Это предполагает необходимость создания специфических моделей для прогноза радиационной обстановки в периоды геомагнитных бурь и поиска оптимальных входных параметров этих моделей.

Последовательность событий появления интенсивных потоков электронов на восстановительной фазе магнитных бурь может быть следующей (см., например, [O'Brien, et al., 2001; Hwang, et al., 2004] и ссылки в них). Во время магнитной бури в суббуревых процессах происходит ускорение электронов магнитосферной плазмы до энергий от единиц до сотен кэВ. Эта популяция так называемых зародышевых электро-

нов является необходимой для генерации более энергичных электронов (релятивистских энергий), как того требуют некоторые ускорительные механизмы (см. например обзоры [Fung, 2004; Friedel, et al., 2002]).

Индикаторами инжекции «зародышевых» электронов во время магнитосферной суббури могут служить ее различные проявления [Акасофу, 1971]. В [Гульельми, Троицкая, 1973] показано, что качественно исследовать процессы инжекции энергичных частиц в магнитосферу позволяют методы гидромагнитной диагностики по наблюдениям пульсаций геомагнитного поля. Мы предполагаем, что индикаторами появления «зародышевых» электронов могут служить иррегулярные пульсации геомагнитного поля типа Pi1, генерация которых тесно связана с инжекцией электронов [Degtyarev, et al., 2009]. Пульсации Pi1, представляющие собой высокочастотное продолжение спектра Pi2 [Troitskaya, 1961; Cambell, Rees, 1961], благодаря более высокой частоте могут служить более точным индикатором начала суббури, чем традиционно используемые Pi2 [Bösinger, Yahnin, 1987]. С точки зрения условий наблюдения иррегулярных пульсаций наилучшие условия создаются на средних широтах. Как показано в [Золотухина, Харченко, 1997; Arnoldy, et al., 1998], одновременно с генерацией Pi1 в авроральной зоне эти пульсации, благодаря существованию околосферного волновода, регистрируются также на средних широтах. При этом среднеширотные пульсации Pi1 менее подвержены влиянию локальных процессов авроральной активности, которые затрудняют определение типа пульсаций в авроральной зоне.

Как одному из возможных факторов, способствующих ускорению «зародышевых» электронов до релятивистских энергий или участвующих в их ускорении, в настоящее время большое внимание уделяется геомагнитным пульсациям типа Pc5 (см., например, [Hwang, et al., 2004; Ukhorskiy, et al., 2005; Perry, et al.,

2005]). Для оценки эффективности магнитных бурь в продуцировании релятивистских электронов в работе [O'Brien, et al., 2001] был предложен индекс, рассчитанный по спектральной мощности пульсаций типа Pc5 в каждом часовом интервале по данным 11 обсерваторий сети Intermagnet. Авторы этой работы пришли к выводу, что скорость солнечного ветра является наилучшим внемагнитосферным параметром, а мощность Pc5-пульсаций – лучшим из внутримангнитосферных параметров для прогностической модели уровня потоков релятивистских электронов. В работе [Kozugeva, et al., 2007] предложен усовершенствованный индекс глобальной волновой УНЧ-активности в диапазоне периодов 150–600 с, который рассчитывается по данным мировой сети магнитных обсерваторий [ftp://space.augsburg.edu/MACCS/ULF_Index/].

Целью данной работы является исследование коррелятивных связей характеристик геомагнитных пульсаций типов P11 и Pc5 с потоками релятивистских электронов на геостационарной орбите в восстановительную фазу магнитных бурь. Для демонстрации возможностей использования геомагнитных пульсаций при прогнозе потоков релятивистских электронов на восстановительной фазе магнитной бури проведен сравнительный анализ динамики характеристик пульсаций типов Pc5 и P11 и потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите в течение трех 9-суточных интервалов, включающих магнитоспокойные периоды и периоды геомагнитных бурь.

Используемые данные

Для анализа были использованы данные по потокам электронов с энергией >2 МэВ, зарегистрированным аппаратурой геостационарного спутника GOES-8 ($\lambda \approx 285^\circ$ E) [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/space_physics_home_fr.html] в 1995–2003 гг. Всего за этот период отмечено 150 магнитных бурь с D_{st} от -30 до -200 нТл [http://swdcd.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html]. Для всех магнитных бурь этого периода рассчитаны среднесуточные величины потоков релятивистских электронов и определены максимальные среднесуточные потоки (J_{rec}) в восстановительную фазу магнитных бурь.

Для выделения геомагнитных пульсаций типа P11 во время магнитных бурь были использованы данные среднеширотных обсерваторий Монды (51.6° N; 100.9° E) ($L=2.1$) и Борок (58.07° N; 38.23° E) ($L=3.0$). Были выделены волновые формы пульсаций P11, связанные с инжекциями электронов, и определена продолжительность их регистрации.

Для исследования пульсаций Pc5 использованы 10-секундные данные обсерваторий Сёрёйя ($S\ddot{o}r\ddot{o}ya$ 70.54° N, 22.22° E; $L=6.8$), Кево ($Kevo$ 69.76° N, 27.01° E; $L=6.2$) и Соданкюля ($Sodankyl\ddot{a}$ 67.37° N, 26.63° E; $L=5.2$) сети магнитометров IMAGE [http://www.ava.fmi.fi/image/index.html]. Наземные обсерватории были выбраны таким образом, чтобы перекрыть по широте область передвижения проекции геостационарной орбиты на земную поверхность при изменении геомагнитной обстановки во время геомагнитных бурь. При подробном сопоставлении динамики параметров геомагнитных пуль-

саций и релятивистских электронов на геосинхронной орбите в ходе трех продолжительных интервалов были использованы также измерения магнитного поля и потоков электронов, проведенные аппаратурой спутников GOES-9 или GOES-10, когда они были расположены на долготе $\lambda \approx 225^\circ$ E [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/space_physics_home_fr.html].

Использование иррегулярных пульсаций геомагнитного поля типа P11 в качестве индикаторов инжекции «зародышевых» электронов в магнитосферу

В качестве параметра, с помощью которого можно было бы оценивать популяцию инжектированных электронов с энергиями десятки кэВ, мы использовали продолжительность регистрации пульсаций P11 на среднеширотной обсерватории. По динамическим спектрам пульсаций P11 рассчитывалась суммарная продолжительность всех зарегистрированных всплесков P11b и пульсаций типа P11c в течение анализируемого периода. Отношение этой суммарной продолжительности к длительности анализируемого периода, выраженное в процентах, является количественной оценкой популяции «зародышевых» электронов. В работе [Дегтярев, Чудненко, 2007] было показано, что на уровень потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите в восстановительную фазу магнитной бури наиболее важное влияние оказывают вариации скорости солнечного ветра и геомагнитная активность в период главной фазы и в начале фазы восстановления магнитной бури. При анализе диагностических возможностей геомагнитных пульсаций мы обратили особое внимание именно на эти периоды магнитных бурь. Для упрощения обсуждения мы в дальнейшем будем называть относительную величину продолжительности пульсаций P11 параметром T_{pi} . Расчеты параметра T_{pi} были сделаны для главной фазы магнитной бури (T_{pi}^{main}), первых 12 ч восстановительной фазы (ранняя восстановительная фаза) (T_{pi}^{rec}), а также для временного интервала, включающего главную и раннюю восстановительную фазы (T_{pi}^{tot}).

Исследование связи параметров пульсаций P11 с уровнем потока релятивистских электронов в восстановительную фазу магнитных бурь было проведено для 28 изолированных (во избежание эффектов суперпозиции) бурь, для которых были доступны данные непрерывных наблюдений (на период бури) на магнитных обсерваториях Монды и Борок. Были рассчитаны значения коэффициентов корреляции J_{rec} с параметром T_{pi} для главной и ранней восстановительной фаз магнитной бури, а также для временного интервала (T_{pi}^{tot}), включающего главную и раннюю восстановительную фазы. Величины коэффициентов корреляции соответственно равны:

$$R(J_{rec}; T_{pi}^{main})=0.36;$$

$$R(J_{rec}; T_{pi}^{rec})=0.54;$$

$$R(J_{rec}; T_{pi}^{tot})=0.62.$$

Для этих же 28 бурь были рассчитаны коэффициенты корреляции между J_{rec} и средним значением скорости солнечного ветра для периода главной фа-

зы и ранней фазы восстановления магнитных бурь. Была получена величина коэффициента корреляции $R(J_{\text{rec}}; V^{\text{tot}})=0.44$. Сравнение полученных коэффициентов корреляции между максимальным потоком релятивистских электронов на восстановительной фазе магнитной бури и V и T_{pi} показывает, что эффективность введенного нами параметра пульсаций $Pi1$ сравнима с эффективностью такого параметра, как скорость солнечного ветра, и даже превышает его для данной выборки магнитных бурь.

Статистический анализ интенсивности $Pc5$ и уровня потоков релятивистских электронов

Для проведения этого анализа мы использовали УНЧ-индекс T_{gr} [Kozyreva, et al., 2007], часовые значения которого приведены в [ftp://space.augsburg.edu/MACCS/ULF_Index/]. Этот индекс рассчитывался с использованием данных глобальной сети наземных магнитных обсерваторий по полной мощности горизонтальных компонент магнитного поля в диапазоне 2–7 МГц (диапазон пульсаций $Pc5$). Значения индекса были усреднены за периоды, необходимые для проведения анализа: среднесуточные ($T_{\text{gr}}^{\text{day}}$), средние за период главной фазы ($T_{\text{gr}}^{\text{main}}$) и средние за первые 12 ч восстановительной фазы бури ($T_{\text{gr}}^{\text{rec}}$).

На рис. 1 представлены результаты кросскорреляционного анализа среднесуточных значений потоков электронов с энергией >2 МэВ (J^{day}) по измерениям GOES-8 за период 1995–2003 гг. и среднесуточных значений УНЧ-индекса ($T_{\text{gr}}^{\text{day}}$). Размер анализируемой выборки $N=2587$. Максимум кросскорреляционной зависимости J^{day} от $T_{\text{gr}}^{\text{day}}$ (кривая 1) наблюдается при сдвиге в 2–3 сут, т. е. возрастание потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите происходит спустя 2–3 сут после возрастания активности УНЧ-колебаний. Тонкой линией на рис. 1 (кривая 2) показана кросскорреляционная функция между J^{day} и среднесуточными значениями скорости солнечного ветра (V^{day}). Максимум корреляции этих величин наблюдается при сдвиге двое суток. Таким образом, рост потока электронов начинается также через двое суток после начала роста скорости солнечного ветра. Максимум кросскорреляции среднесуточных значений скорости солнечного ветра и $T_{\text{gr}}^{\text{day}}$ наблюдается при нулевом сдвиге (рис. 1, кривая 3): генерация колебаний $Pc5$ начинается вслед за возрастанием скорости солнечного ветра, и только спустя двое суток происходит возрастание потока релятивистских электронов. Отсюда следует, что на рост потока электронов существенное влияние, по видимому, оказывает продолжительная предварительная глобальная УНЧ-активность в диапазоне $Pc5$. К аналогичным выводам пришли авторы работы [Потапов, Полюшкина, 2010].

Дополнительно был проведен корреляционный анализ максимальных среднесуточных значений потоков релятивистских электронов в восстановительную фазу 150 магнитных бурь (J_{rec}), зарегистрированных за этот же период (1995–2003), и суммы часовых значений T_{gr} -индекса за период ранней восстановительной фазы ($T_{\text{gr}}^{\text{rec}}$). Коэффициент корреляции между этими двумя переменными оказывается

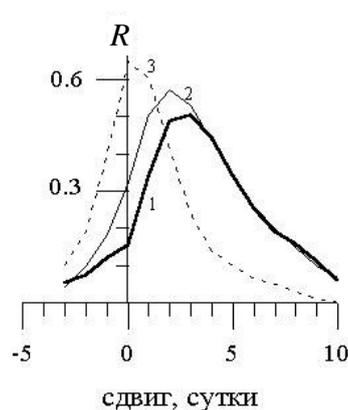


Рис. 1. Кросскорреляционные функции среднесуточных значений потоков релятивистских электронов (J^{day}) на геосинхронной орбите (по данным спутника GOES-8 за период 1995–2003) и (1) глобального индекса УНЧ ($T_{\text{gr}}^{\text{day}}$), (2) скорости солнечного ветра (V); (3) скорости солнечного ветра и индекса $T_{\text{gr}}^{\text{day}}$.

практически таким же ($R=0.53$), как и в максимуме кросскорреляционной функции на рис. 1 (кривая 1). Отметим, что коэффициент корреляции между J_{rec} и УНЧ-индексом $T_{\text{gr}}^{\text{main}}$, полученным для главных фаз 150 магнитных бурь, значительно ниже. Как отмечают авторы работы [Kozyreva, et al., 2007], ускорение электронов под воздействием энергии УНЧ-колебаний – медленный процесс, поэтому, скорее всего, текущее значение электронного потока определяется не мгновенным значением волновой интенсивности, а «предысторией» накачки волновой энергии УНЧ-колебаний в магнитосфере.

Сопоставление динамики геомагнитных пульсаций $Pi1$ и $Pc5$ и уровня потоков релятивистских электронов на геосинхронной орбите

Рассмотрим подробно динамику характеристик геомагнитных пульсаций типов $Pi1$ и $Pc5$ в ходе трех 9-суточных интервалов с резко выраженными отличиями в поведении потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите. Каждый из рассмотренных интервалов включает в себя предбуревую период продолжительностью несколько суток и магнитную бурю. Минимальные значения D_{st} -индекса составляют -116 нТл, -114 нТл и -92 нТл во время магнитных бурь с началом 10 марта 1998 г. (событие 1), 18 апреля 2001 г. (событие 2) и 17 мая 2000 г. (событие 3) соответственно. Во время первой из рассматриваемых бурь (март 1998 г.) поток электронов не испытывает типичного уменьшения в период главной фазы, но существенно, примерно на три порядка величины, возрастает в период фазы восстановления магнитной бури (рис. 2). В течение второй бури (апрель 2001 г.) отмечается типичное поведение потока электронов, но на фазе восстановления поток электронов не достигает предбуревую уровня (рис. 3). И третий случай (рис. 4) – поток релятивистских электронов практически не отреагировал на магнитную бурю.

При анализе динамики пульсаций $Pc5$ использованы данные трех обсерваторий, расположенных в окрестности наземной проекции геосинхронной орбиты, а также данные по магнитному полю, полу-

ченные на геостационарных спутниках GOES-9 или GOES-10. Из исходных данных по магнитному полю был удален низкочастотный тренд. Спектральные плотности отфильтрованных данных были вычислены прямым преобразованием Фурье, при этом использовано скользящее временное окно Габора [Mirošević, Bracewell, 1992]. Затем в полосе частот 1.6–3.3 мГц определены максимумы, по которым построен временной ход мощности пульсаций Pc5 (W_{pc}), приведенный на рисунках. Мощность волнового поля пульсаций Pc5 на трех авроральных станциях изменяется синхронно, поэтому, чтобы не загромождать рисунки, на рис. 2–4 приведены вариации амплитудных спектров только станции Кево (W_{pc}^{Kevo}), на которой преимущественно наблюдались максимальные значения интенсивности. Для оценки глобальности развития пульсаций Pc5 приведены вариации мощности пульсаций, полученные по данным геосинхронных спутников (W_{pc}^{GOES}). При одновременном изменении мощности волнового поля пульсаций, регистрируемого наземными обсерваториями и геосинхронными спутниками (разность долгот составляет $\sim 200^\circ$), можно говорить о глобальном характере развития пульсаций Pc5. Для сравнения на рис. 2–4 приведены также вариации глобального УНЧ-индекса (T_{gr}). Отметим, что использование большого числа станций для расчета индекса T_{gr} , по мнению авторов [Kozuyeva, et al., 2007], приводит к сглаживанию и уменьшению значений индекса. При построении этих рисунков параметр T_{pi} рассчитывался по суммарной продолжительности регистрации пульсаций Pi1 на obs. Борки в каждом часовом интервале. На рис. 2–4 выделено три временных интервала: «А» и «В» – предбуревые периоды продолжительностью ~ 3 сут и ~ 2 сут соответственно и «С» – период главной фазы и фазы восстановления бури.

Событие 1 (март 1998 г.)

На рис. 2 приведены вариации скорости солнечного ветра и магнитосферных параметров для периода с 12:00 UT 5 марта по 12:00 UT 14 марта 1998 г. Перед началом магнитной бури (рис. 2, в) потоки электронов с энергией >2 МэВ по измерениям обоих спутников GOES приблизились (интервал «В») к минимальному уровню потока для данной энергии за период 1996–2000 гг. [Дегтярев, Чудненко, 2007]. Характерный для главной фазы магнитной бури спад потока для электронов с энергией >2 МэВ отсутствует. В конце главной фазы бури начинается увеличение потоков электронов, и в течение фазы восстановления бури потоки электронов с энергией >2 МэВ превысили предбуревой уровень примерно на три порядка.

До начала магнитной бури (интервалы «А» и «В») интенсивность пульсаций Pc5 не превышает 1000 нТл²/Гц, по данным авроральной обсерватории Кево (рис. 2, д), а на геостационарной орбите, по данным GOES-9 (рис. 2, е), существенно меньше. Интервал «А» (рис. 2, г–д) характеризуется низкой мощностью пульсаций Pc5 с отдельными несинхронными (на станции Кево и GOES-9) увеличениями мощности. Можно отметить, что отдельные случаи повышения мощности Pc5 и индекса T_{gr} в середине 9 марта

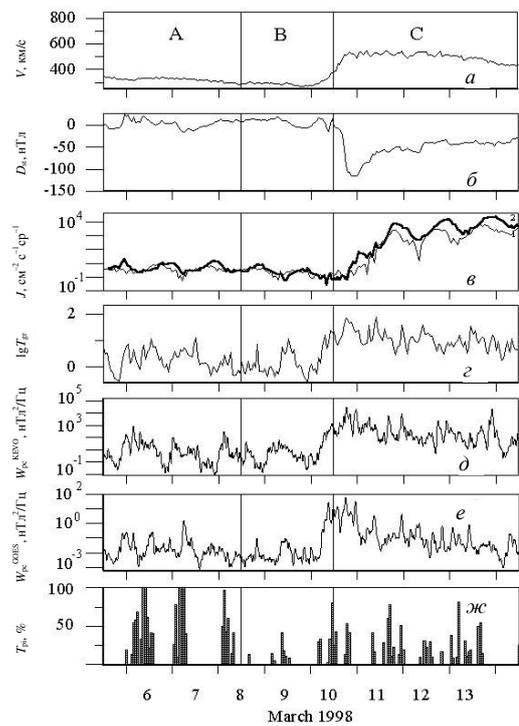


Рис. 2. Вариации скорости солнечного ветра (а) и магнитосферных характеристик (б–ж) для периода с 12:00 UT 5 марта по 12:00 UT 14 марта 1998 г.: D_{st} -индекса (б); потоков электронов с энергией >2 МэВ по данным спутника GOES-8 (1) и GOES-9 (2) (в); глобального УНЧ-индекса T_{gr} (г); мощности пульсаций Pc5 по данным авроральной обсерватории Кево (д); мощности пульсаций Pc5 по данным спутника GOES-9 (е); параметра T_{pi} (ж).

не оказывают влияния на уровень потока энергичных частиц (рис. 2, д, е). С возрастанием скорости солнечного ветра (в конце интервала «В») наблюдается одновременное возрастание индекса пульсаций T_{gr} и мощности пульсаций Pc5 на станции Кево и спутнике GOES-9. В 13:00 UT зарегистрировано начало главной фазы бури. В это время скорость солнечного ветра (рис. 2, а) достигает значения ~ 450 км/с. В главную фазу магнитной бури регистрируются максимальные мощность пульсаций Pc5 и значение T_{gr} -индекса. В восстановительную фазу мощность Pc5 и индекс T_{gr} несколько уменьшились, но оставались значительно выше предбуревого уровня. Отметим синхронность изменений индекса пульсаций T_{gr} и мощности Pc5, вычисленных по наземным и спутниковым данным, особенно в самом начале восстановительной фазы. Этот факт свидетельствует о больших пространственных масштабах волнового поля Pc5 в раннюю восстановительную фазу.

В интервале «А» регистрируются продолжительные пульсации Pi1. Однако уровень потоков электронов на геостационарной орбите остается низким. В интервале «В» перед бурей (до 10 марта) наблюдается только редкое появление пульсаций Pi1. Уровень потоков электронов в этот период остается практически неизменным. Главная и восстановительная фазы бури отмечены частым появлением пульсаций Pi1 по данным станции Борки, совпадающих по времени, особенно в раннюю восстановительную фазу магнитной бури, с увеличением мощности пульсаций Pc5.

Анализ события 1 в целом с точки зрения сопос-

тавления динамики уровня потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите и параметров геомагнитных пульсаций типа Pc5 и Pi1 позволяет отметить следующие особенности. До начала магнитной бури, несмотря на большую продолжительность регистрации Pi1, которая, по нашему предположению, позволяет оценивать количественно популяцию «зародышевых» электронов как большую, уровень потока остается низким. При этом не регистрируются глобальные Pc5: интенсивность Pc5 не превышает $1000 \text{ нТл}^2/\text{Гц}$, не наблюдается синхронных вариаций интенсивности Pc5 в разнесенных по долготе пунктах регистрации. Усиление потока релятивистских электронов происходит при одновременной регистрации глобальных Pc5 и среднеширотных Pi1 (конец интервала «В» и интервал «С»).

Событие 2 (апрель 2001 г.)

На рис. 3 показана геофизическая обстановка за период 13–21 апреля 2001 г., захватывающей конец восстановительной фазы очень большой ($D_{st} = -271 \text{ нТл}$) бури 11–12 апреля (интервал «А»), спокойный период перед рассматриваемой бурей 15–17 апреля (интервал «В») и бурю 18–21 апреля (интервал «С»). В отличие от рис. 2, на рис. 3 интенсивность пульсаций Pc5 (панель e) и поток электронов (панель в) приведены по данным спутника GOES-10.

Динамика электронных потоков для события 2 (13–21 апреля 2001 г.) имеет диаметрально противоположный характер по сравнению с событием 1. До начала магнитной бури 18 апреля (интервал «В») по данным GOES-10 (рис. 3, в) средний уровень потока электронов с энергией $>2 \text{ МэВ}$ очень высокий ($\sim 1.5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$). В главную фазу отчетливо проявляется резкий спад уровня потока электронов (более чем на пять порядков величины), в восстановительную фазу – рост потока электронов (до $\sim 3.4 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$). Таким образом, уровень потока электронов с энергией $>2 \text{ МэВ}$ в конце восстановительной фазы был примерно на два порядка ниже предбуревоего.

Временные вариации мощности пульсаций Pc5 в течение интервалов «А» и «В» перед магнитной бурей 18 апреля 2001 г. существенно отличаются от рассмотренного выше события 1. Перед началом бури (интервал «В»), на фоне уменьшающейся скорости солнечного ветра, вариации индекса пульсаций T_{gr} и мощности пульсаций Pc5 по наземным и спутниковым данным не имеют синхронных изменений. В этот же период пульсации Pi1 редки и непродолжительны. Значительное увеличение мощности Pc5, регистрируемое наземными и спутниковыми обсерваториями, и увеличение глобального индекса T_{gr} начались одновременно с резким возрастанием скорости солнечного ветра и главной фазой магнитной бури (интервал «С»). В фазу восстановления мощность пульсаций постепенно уменьшается и становится несколько ниже, чем в интервале «В». В период главной фазы и фазы восстановления наблюдаются редкие и незначительные по длительности случаи пульсаций Pi1.

Особое внимание обратим на временной интервал «А» 13–15 апреля. На фоне восстановительной фазы магнитной бури 11–12 апреля 2001 г. происходит резкий рост скорости солнечного ветра до $\sim 800 \text{ км/с}$. По наземным и спутниковым магнитным данным отмечается значительное увеличение мощности пульсаций

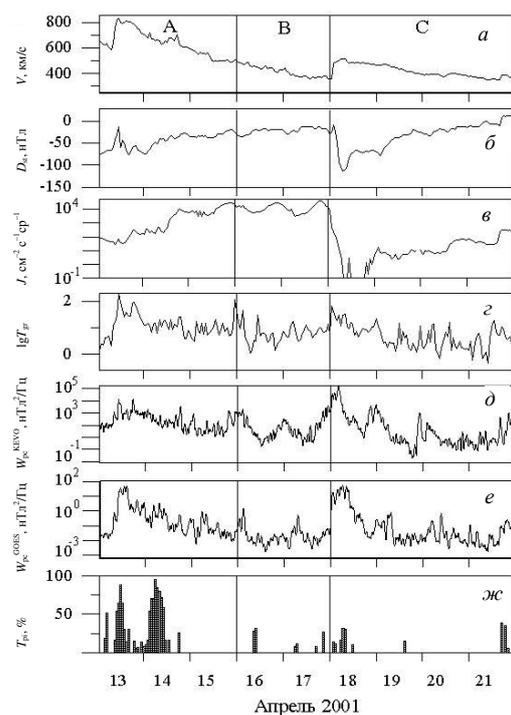


Рис. 3. Вариации скорости солнечного ветра (а) и магнитосферных характеристик (б–ж) для периода с 13 по 21 апреля 2001 г.: D_{st} -индекса (б); потока электронов с энергией $>2 \text{ МэВ}$ (по данным спутника GOES-10) (в); глобального УНЧ-индекса T_{gr} (г); мощности пульсаций Pc5 по данным авроральной обсерватории Кево (д); мощности пульсаций Pc5 по данным спутника GOES-10 (е); параметра T_{pi} (ж).

Pc5 и индекса пульсаций T_{gr} . Одновременно наблюдаются частые и продолжительные пульсации Pi1 на станциях Монды и Борок. Высокий уровень пульсаций Pc5 сохраняется в течение всего интервала «А». Продолжительные и частые пульсации Pi1 наблюдаются в первую половину суток 14 апреля. Одновременно поток релятивистских электронов увеличивается примерно на два порядка величины.

Событие 3 (май 2000 г.)

На рис. 4 изображена геофизическая обстановка 12–20 мая 2000 г. (данные представлены в формате рис. 3). Потоки электронов в течение всего периода были довольно низкими – в пределах $\sim 10^0 - 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. В период главной фазы и ранней фазы восстановления бури отмечается нарушение суточного хода потоков электронов. Уровень потока электронов в восстановительную фазу не превысил предбуревоего. Динамику геомагнитных пульсаций Pc5 и Pi1 за период 12–20 мая можно характеризовать следующим образом.

Интервал «А». Глобальные пульсации Pc5 отсутствуют. В среднем мощность пульсаций Pc5 по станции Кево – около $10^2 \text{ нТл}^2/\text{Гц}$. 13 мая отмечаются продолжительные пульсации Pi1. Уровень потоков электронов без значительных изменений.

Интервал «В». Происходит одновременное увеличение мощности пульсаций в течение $\sim 6 \text{ ч}$ 16 мая в Кево и на GOES. В этот же период наблюдаются продолжительные пульсации Pi1. Поток электронов не отреагировал на эти увеличения параметров Pi1 и Pc5.

Интервал «С». В период главной фазы наблюдается одновременное кратковременное увеличение индекса

Таблица 1

Параметры пульсаций перед началом и во время магнитной бури.

Магнитная буря	J_{rec}	$T_{\text{pi}}^{\text{tot}}$	$T_{\text{pi}}^{\text{lrec}}$	$W_{\text{pc}}^{\text{pre}}$	$W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$	$W_{\text{pc}}^{\text{lrec}}$	$T_{\text{gr}}^{\text{tot}}$	$T_{\text{gr}}^{\text{lrec}}$
10.03.1998 г.	$4.7 \cdot 10^3$	26.7	12.4	121	3298	627.5	1.28	1.05
18.04.2001 г.	$3.3 \cdot 10^1$	1.7	0.6	1722	11565	473.3	0.71	0.62
17.05.2000 г.	$2.1 \cdot 10^1$	12.5	0	3328	5732	243.2	0.87	0.62

* величина потока J_{rec} дана в $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$.

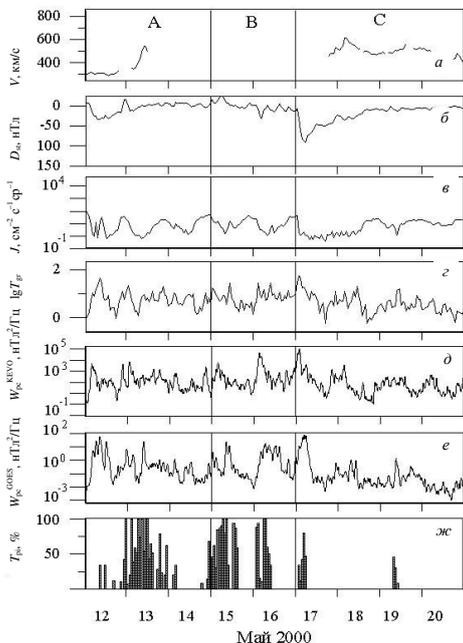


Рис. 4. Вариации скорости солнечного ветра и магнитосферных характеристик для периода с 12 по 20 мая 2000 г. (обозначения те же, что на рис. 3).

T_{gr} , а также мощности Pc5 по данным наземных станций и GOES-10. Во время фазы восстановления некоторые увеличения мощности Pc5, зарегистрированные наземной станцией и на GOES, не совпадали по времени, что свидетельствует о локальности процесса. Пульсации Pi1, наблюдавшиеся в течение всей главной фазы, на фазе восстановления практически не появляются.

Кратковременное синхронное возрастание интенсивности Pc5 и появление Pi1 произошло в главную фазу магнитной бури, обычно характеризующуюся спадом потока релятивистских электронов. В главную фазу произошло только незначительное уменьшение потока.

Сравнение параметров пульсаций в ходе магнитных бурь 10 марта 1998 г., 18 апреля 2001 г. и 17 мая 2000 г. (события 1–3)

Для проведения сравнительного анализа были рассчитаны средние величины параметров пульсаций Pc5 и Pi1 за выбранные периоды трех бурь, входящих в события 1–3, обозначенные следующим образом: «pre» – 24-часовой период перед началом магнитной бури; «tot» – период, включающий главную фазу и 12-часовой период начала фазы восстановления; «lrec» – период с 13 до 36 ч от начала фазы восстановления (поздняя фаза восстановления). В табл. 1 представлены значения средних величин параметров

пульсаций и электронного потока (по измерениям на спутнике GOES-8), полученные для этих периодов.

Данные табл. 1 количественно подтверждают результаты, полученные при качественном рассмотрении рис. 2–4. Интенсивные потоки релятивистских электронов генерируются при условии, что суббульевые инжекции электронов продолжаются более 20 % времени главной фазы бури и начальной фазы восстановления (для бури 10 марта 1998 г. параметр $T_{\text{pi}}^{\text{tot}}=26.7$). При этом суббульевые инжекции часто наблюдаются и в более позднюю фазу восстановления. Отметим, что индекс пульсаций (T_{gr}) также показывает более значительную величину в главную фазу и фазу восстановления бури 10 марта 1998 г., чем во время двух других бурь.

Однако из табл. 1 следует, что более высокие величины параметра $W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$ наблюдаются как раз для бурь 18 апреля 2001 г. и 17 мая 2000 г., т. е. для бурь без интенсивных потоков электронов на фазе восстановления. Здесь мы в приведенных данных сталкиваемся с двумя кажущимися противоречиями.

Первое – несоответствие между средними величинами индексов пульсаций (T_{gr}) и мощностью Pc5, наблюдаемой на Кево для отмеченных выше периодов бурь. Например, при сравнении случаев 10 марта 1998 г. и 18 апреля 2001 г. мы видим, что $W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$ для 10 марта 1998 г. более чем в 3 раза меньше величины $W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$ для 18 апреля 2001 г., тогда как по $T_{\text{gr}}^{\text{tot}}$ мы видим обратную картину. Напомним, что период «tot» включает в себя главную фазу магнитной бури, в которую типично наблюдаются мощные иррегулярные пульсации Pi2. Они входят в частотный диапазон Pc5 и могут внести вклад в параметр $W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$. Для индекса $T_{\text{gr}}^{\text{tot}}$, рассчитываемого по данным большого количества станций, этот вклад нивелируется.

Второе противоречие заключается в том, что при большем значении параметра $W_{\text{pc}}^{\text{tot}}$ для бурь 18.04.2001 г. и 17.05.2000 г., чем для случая 10 марта 1998 г., во время этих двух бурь наблюдаются менее интенсивные потоки релятивистских электронов на фазе восстановления магнитной бури.

В ходе магнитной бури 10.03.1998 г. продолжительное (более суток) одновременное возрастание мощности Pc5 на станции Кево и GOES и почти синхронные вариации параметров $W_{\text{pc}}^{\text{Kevo}}$ и $W_{\text{pc}}^{\text{GOES}}$ и индекса T_{gr} позволяют говорить о глобальном характере Pc5 (см. рис. 2, конец периода «B» и начало периода «C»). В периоды магнитных бурь событий 2 и 3 возрастания параметров $W_{\text{pc}}^{\text{Kevo}}$ и $W_{\text{pc}}^{\text{GOES}}$ и индекса T_{gr} являются непродолжительными и не имеют синхронного характера (см. рис. 3, периоды «B» и «C», и рис. 4). Параметр $T_{\text{pi}}^{\text{tot}}$ (табл. 1) значительно выше 10 марта 1998 г., чем 18 апреля 2001 г.

Обратим также внимание на увеличение потока релятивистских электронов (на ~2 порядка величины), произошедшее 14 апреля 2001 г. (см. рис. 3, интервал «А») на восстановительной фазе большой магнитной бури. Резкое возрастание скорости солнечного ветра произошло 13 апреля 2001 г., что вызвало значительный и продолжительный рост параметра W_{pc}^{GOES} и индекса T_{gr}^{day} и менее значительное увеличение параметра W_{pc}^{Kevo} . В табл. 2 приведены среднесуточные значения параметров пульсаций для этого периода. Величина W_{pc}^{day} в несколько раз меньше, чем в главную фазу магнитной бури 18 апреля 2001 г., T_{pi}^{day} превышает 20 %, как и в случае главной фазы бури 10 марта 1998 г. (см. табл. 1).

Таблица 2

Параметры пульсаций для 13–14 апреля 2001 г.

	T_{pi}^{day}	T_{gr}^{day}	W_{pc}^{day}
13.04.01	20	1.25	1411
14.04.01	27.4	1.05	358

Сопоставляя динамику уровня потока релятивистских электронов и параметров пульсаций в ходе рассмотренных событий, можно сделать следующий вывод. Большое влияние на возрастания потока релятивистских электронов на геосинхронной орбите оказывает величина популяции «зародышевых» электронов и развитие глобальных пульсаций Pc5 в течение продолжительного времени. Кратковременное возрастание мощности УНЧ-колебаний не оказывает существенного влияния на уровень электронного потока. Это вполне объяснимо, если принять во внимание тот факт, что ускорение электронов при их резонансном взаимодействии с геомагнитными пульсациями типа Pc5 не является единственным возможным механизмом ускорения. Так, например, в литературе обсуждается целый ряд других механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий (см., например, [Бахарева, 2003; Meredith, et al., 2003; O'Brien, et al., 2003, Li Liuyuan, et al., 2005] и ссылки в них). В одно и то же время могут действовать различные механизмы ускорения электронов, которые в конечном счете и формируют потоки релятивистских электронов.

Из двухступенчатой схемы генерации релятивистских электронов следует, что только при сочетании большой популяции «зародышевых» электронов с высокой мощностью продолжительных Pc5 могут появиться интенсивные потоки релятивистских электронов. Само по себе наличие «зародышевых» электронов является необходимым, но не достаточным условием для возрастания интенсивности потока релятивистских электронов. В равной степени это относится и к длиннопериодным пульсациям. Расчеты показывают, что коэффициенты корреляции между максимальными среднесуточными потоками электронов (J_{rec}) на восстановительной фазе магнитной бури и отдельными параметрами пульсаций составляют:

$$R\{J_{rec}; T_{gr}^{tot}\}=0.418,$$

$$R\{J_{rec}; W_{pc}^{tot}\}=0.405,$$

$$R\{J_{rec}; T_{pi}^{tot}\}=0.527.$$

Используя же связку параметров T_{gr}^{tot} и T_{pi}^{tot} , W_{pc}^{tot} и T_{pi}^{tot} , методом множественной корреляции мы получим более высокие коэффициенты корреляции: $R\{J_{rec}; (T_{gr}^{tot}, T_{pi}^{tot})\}=0.549$ и $R\{J_{rec}; (W_{pc}^{tot}, T_{pi}^{tot})\}=0.683$ соответственно. Заметим, что при использовании T_{pi}^{tot} с W_{pc}^{tot} коэффициент корреляции увеличивается больше, чем при использовании T_{pi}^{tot} с УНЧ-индексом (T_{gr}^{tot}).

Обсуждение результатов

В данной работе мы исходили из предположения, что для генерации потоков релятивистских электронов во внешнем поясе радиации необходимы два фактора: появление в магнитосфере так называемых «зародышевых» электронов с энергиями десятки кэВ и последующее ускорение их до релятивистских энергий. Геомагнитные пульсации типов Pi1 и Pc5 предоставляют хорошие возможности для диагностики динамики уровня релятивистских электронов. На первом этапе – как индикатор появления в магнитосфере «зародышевых» электронов и на последнем этапе – как один из механизмов, и, может быть, самый эффективный, энергизации предварительно ускоренных «зародышевых» электронов (посредством других механизмов) до релятивистских энергий. Причем, с одной стороны, геомагнитные пульсации непосредственно связаны с генерацией «зародышевых» электронов и их ускорением до релятивистских энергий, чем отличаются от других общепринятых индексов магнитосферной активности, которые только косвенно связаны с потоками высокоэнергичных электронов внешнего радиационного пояса. С другой стороны, выявить количественные характеристики геомагнитных пульсаций типа Pi1 и Pc5 можно по данным ограниченного числа магнитных обсерваторий, что важно для оперативного прогноза опасных ситуаций на высоких орбитах в радиационном поясе.

Введенный параметр T_{pi} сравним по эффективности с таким параметром, как скорость солнечного ветра, которая во всех прогностических моделях считается наиболее значимым входным параметром.

Мы полагаем, что для создания оперативно действующих прогностических моделей в качестве дополнительных входных параметров эффективным будет использование параметров иррегулярных геомагнитных пульсаций T_{pi} и спектральной мощности Pc5, рассчитываемых по данным не глобальной сети наземных станций, а ограниченного числа среднеширотных и авроральных станций. Подчеркнем, что в настоящей работе для получения этих параметров использованы данные только двух среднеширотных и трех авроральных станций.

Выводы

1. Среднеширотные геомагнитные пульсации Pi1 могут быть индикатором эффективности магнитной бури в продуцировании интенсивных потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите. Преимущество использования данного индикатора по сравнению с другими, например со скоростью и плотностью солнечного ветра, заключается в том, что в реальном времени достаточно просто

можно получить количественную оценку параметра T_{pi} по данным одной или нескольких среднеширотных станций.

2. Мощные и продолжительные глобальные пульсации Pc5 на восстановительной фазе магнитной бури в сочетании с частыми суббуревыми инжекциями энергичных электронов характерны для более высоких потоков релятивистских электронов, регистрируемых в восстановительную фазу магнитной бури.

Работа выполнена в рамках проекта Президиума СО РАН фундаментальных исследований, выполняемых совместно со сторонними организациями, тема № 69 «Солнечно-земные связи в условиях минимума и роста солнечной активности в 24-м цикле по данным совместной российско-китайско-монгольской сети станций». Частично работа была поддержана грантом РФФИ 10-05-00661.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С. Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971. 316 с.
- Бахарева М.Ф. Нестационарное статистическое ускорение релятивистских частиц и его роль во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43, № 6. С. 737–744.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 209 с.
- Дегтярев В.И., Чудненко С.Э. Индикаторы увеличения потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите во время геомагнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 2007. Т. 47, № 1. С. 11–17.
- Золотухина Н.Ф., Харченко И.П. Оценка энергетических характеристик суббуревых возмущений по среднеширотным геомагнитным пульсациям // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. 1997. Вып. 107. С. 186–191.
- Панасюк М.И. Моделирование радиационных поясов Земли // Математические модели ближнего космоса. Всесоюзное совещание, посвященное памяти В.П. Шабанского. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 50–55.
- Потапов А.С., Полюшкина Т.Н. Экспериментальное свидетельство прямого проникновения ULF-волн из солнечного ветра и ускорения ими электронов радиационного пояса // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 15 (в печати).
- Arnoldy R. L., Posch J. L., Engebretson M. J., et al. Pi1 magnetic pulsations in space and at high latitudes on the ground // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 23581–23591.
- Barker A.B., Li X., Selesnick R.S. Modeling the radiation belt electrons with radial diffusion driven by the solar wind // Space Weather. 2005. V. 3, N 10. P. S10003. doi:10.1029/2004SW000118.
- Bösinger T., Yahnin A.G. PiB type magnetic pulsations as a high time resolution monitor of substorm development // Ann. Geophysical. 1987. V. 5. P. 231–238.
- Cambell W.H., Rees M.H. A study of auroral coruscations // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 41.
- Degtyarev V.I., Kharchenko I.P., Potapov A.S., et al. Qualitative estimation of magnetic storm efficiency in producing relativistic electron flux in the Earth's outer radiation belt using geomagnetic pulsations data // Adv. Space Res. 2009. V. 43. P. 829–836.
- Fung S.F. Survey of current situation in radiation belt modeling // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 1441–1450.
- Friedel R.H.W., Reeves G.D., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – a review // J. Atmos. Solar Terr. Physics. 2002. V. 64. P. 265–282.
- Hwang J., Min K.W., Lee E., et al. A case study to determine the relationship of relativistic electron events to substorm injections and ULF power // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. P. L23801. Doi:10.1029/2004GL021544.
- Kozyreva O., Pilipenko V., Engebretson M.J., et al. In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons // Plan. Space Sci. 2007. V. 55. P. 755–769.
- Li Liuyuan, Cao Jinbin, Zhou Guocheng. Combined acceleration of electrons by whistler-mode and compressional ULF turbulences near the geosynchronous orbit // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, N A03. P. 203. doi:10.1029/2004JA010628.
- Meredith N.P., Cain M., Horne R.B., et al. Evidence for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies from a survey of geomagnetically disturbed periods // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A6. P. 1248. doi:10.1029/2002JA009764.
- Mirovic D., Bracewell R.N. Whistler analysis in the time-frequency plane using chiplets // J. Geophys. Res. 1992. V. 97, N A11. P. 17199–17204.
- O'Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D., et al. Wic magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit? // J. Geophys. Res. 2001. V. 106, N A8. P. 15533–15544.
- O'Brien T.P., Lorenzen T.R., Mann I.R., et al. Energization of relativistic electrons in the presence of ULF power and MeV microburst for dual ULF and VLF acceleration // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N A8. P. 1329. doi: 10.1029/2002JA009784.
- Perry K.L., Hudson M.K., Elkington S.R. Incorporating spectral characteristics of Pc5 waves into three-dimensional radiation belt modeling and the diffusion of relativistic electrons // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, N A03. P. 215. doi:10.1029/2004JA010760.
- Troitskaya V.A. Pulsations of the Earth's electromagnetic field with periods of 1 to 15 seconds and their connection with phenomena in the high atmosphere // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. P. 5–18.
- Ukhorskiy A.Y., Takahashi K., Anderson B.J., Korth H. Impact of toroidal ULF waves on the outer radiation belt electrons // J. Geophys. Res. 2005. V. 110, N A10. P. 202. doi:10.1029/2005JA011017.
- Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 953–956.
- ftp://space.augsburg.edu/MACCS/ULF_Index/.
- http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/space_physics_home_fr.html.
- <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>.
- <http://www.ava.fmi.fi/image/index.html>.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Исследовательский центр по астрономии и геофизике МАН, Улан-Батор