

ВКЛАД ГЛОБАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ Pc5 В МАГНИТНУЮ ВОЗМУЩЕННОСТЬ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

А.С. Потапов, Б. Цэгмед, Т.Н. Полюшкина

CONTRIBUTION OF GLOBAL Pc5 OSCILLATIONS TO THE MAGNETIC DISTURBANCE DURING GEOMAGNETIC STORMS

A.S. Potapov, B. Tsegmed, T.N. Polyushkina

Исследуется вклад глобальных колебаний магнитосферы в магнитную возмущенность во время магнитосферных бурь. Для этого используются базы магнитных данных мировой сети ИНТЕРМАГНЕТ в сочетании с данными межпланетных и внутримagnetосферных измерений магнитного поля и плазмы, а также с наборами индексов K_p , D_{st} и AE . Выявлены условия в солнечном ветре и магнитосфере, наиболее благоприятные для генерации глобальных Pc5. Оценен вклад этих колебаний в вариации уровня магнитной возмущенности, определяемого индексом AE . Результаты подтверждают участие магнитосферных МГД-колебаний в процессах поступления энергии из солнечного ветра и ее диссипации в магнитосфере.

A contribution of global magnetospheric oscillations to the magnetic disturbance during magnetospheric storms is investigated. To do this, we use the bases of magnetic data from the global network INTERMAGNET together with data from interplanetary and intramagnetospheric measurements of the magnetic field and plasma and also with sets of K_p , D_{st} and AE indices. Solar wind and magnetosphere conditions favorable for generating global Pc5 has been revealed. The contribution of these oscillations to variations of the magnetic storminess level determined by AE index was estimated. The results confirm that magnetospheric MHD oscillations take part in processes of the solar wind energy input and dissipation in the magnetosphere.

Введение

Возросший в последние годы интерес к изучению ультранизкочастотных (ULF – единицы миллигерц) МГД-колебаний магнитосферы, проявляющихся в магнитных наблюдениях в виде геомагнитных пульсаций Pc5, объясняется их непосредственным участием в процессах, определяющих состояние космической погоды. Действительно, с одной стороны, имеется уже много и теоретических, и экспериментальных доказательств [1–3] того, что колебания Pc5 играют решающую роль в ускорении электронов радиационных поясов до релятивистских энергий, создавая, таким образом, крайне неблагоприятные условия для работы космических систем, особенно для аппаратов, находящихся на высоких околоземных орбитах. С другой стороны, есть все основания полагать, что колебания Pc5, особенно когда они во время сильных возмущений принимают глобальный характер, участвуют в другом очень важном с точки зрения космической погоды, да и всей физики магнитосферы, процессе – передаче энергии солнечного ветра в магнитосферу. Именно на последний аспект проблемы ULF-осцилляций мы хотим обратить внимание в данной работе.

Но сначала, используя результаты многолетних наблюдений на всемирной сети магнитных обсерваторий, дадим описание основных свойств глобальных геомагнитных пульсаций Pc5 и покажем их связь с вне- и внутримagnetосферными условиями.

Отбор данных и их обработка

Глобальные колебания Pc5 – это крупномасштабные гидромагнитные волны в частотном диапазоне от 1.7 до 5.7 мГц (периоды 150–600 с). По своей амплитуде, длительности и области наблюдения они существенно отличаются от обычных колебаний Pc5 [4, 5]. В [4] на основе сопоставления наблюдений

глобальных событий Pc5 со свойствами классических авроральных пульсаций Pc5, изученных в статистическом исследовании [4], перечислены следующие отличия глобальных осцилляций от обычных, наиболее часто наблюдающихся колебаний.

1. Типичная амплитуда классических Pc5, согласно [4], не превышает 30 нТл в максимуме амплитудного профиля. В случае глобальных Pc5 амплитуда на авроральных станциях достигает 200 нТл. Это почти на порядок выше амплитуды классических Pc5.

2. Классические пульсации Pc5 длятся обычно 0.5–1.5 ч. Длительность глобальных Pc5 превышает обычно 2 ч, а событие в октябре 2003 г. продолжалось около 42 ч.

3. Спад амплитуды от авроральных к средним широтам в случае глобальных Pc5 происходит намного более плавно, чем для классических Pc5. Более того, для глобальных Pc5 характерно приэкваториальное усиление амплитуды. Классические же Pc5 наблюдаются только в достаточно высоких широтах, они типичны для авроральных и субавроральных областей. Глобальные Pc5 являются существенно глобальным явлением; они наблюдаются на всех обсерваториях от полярных шапок до экватора, от полуденного меридиана до полуночного. Типичная картина пространственного распределения интенсивности колебаний по поверхности Земли показана на рис. 1.

4. Классические Pc5 имеют структуру волнового поля, характерную для альфвеновских резонансных колебаний силовых линий. Что касается глобальных Pc5, то их амплитудный профиль, отсутствие обращений поляризации чаще всего свидетельствуют против гипотезы об их обусловленности альфвеновскими резонансами силовых линий (см. [5]).

В поисках событий глобальных Pc5 были просмотрены магнитограммы сети обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ с 1991 г., когда эта сеть начала работать,

по 2005 г. включительно. Путем визуального просмотра неотфильтрованных суточных магнитограмм мировой сети магнитных обсерваторий проводился поиск глобальной волновой активности в диапазоне Pc5, признаком которой было наличие пульсаций на всех широтах определенного меридиана от полярных шапок до дипольного экватора. Далее, чтобы составить численную характеристику события как глобального явления для дальнейшего статистического анализа, выбирались две станции, расположенные приблизительно на противоположных меридианах в интервале исправленных геомагнитных широт от 40 до 60° южной или северной широты. Одна из станций была близка к местному геомагнитному полудню, а другая – к местной полуночи. Подсчитывались среднечасовые значения амплитуды Pc5 для обеих станций в течение двухсуточного (48-часового) интервала, охватывающего анализируемое событие. Считалось, что данный часовой интервал содержит глобальные колебания, если амплитуды на выбранных станциях одновременно превышают определенный порог. В качестве такого порога было принято значение амплитуды, равное 2 нТл, если станция располагалась в полосе широт от 40 до 50°, и равное 5 нТл, если широта станции лежала в пределах от 50 до 60°. Событие в целом считалось глобальным, если указанный критерий удовлетворялся, по крайней мере, для трех из 48-часовых интервалов. Для изучения резонансной структуры поля колебаний каждое из обнаруженных событий подвергалось спектральному анализу, и в пределах частотной полосы Pc5 отыскивались доминирующие пики в спектрах мощности колебаний на каждой из станций меридиана.

Глобальные колебания Pc5 – не менее редкое явление, чем сверхскоростные потоки, их порождающие. За 15 лет, с 1991 по 2005 г., Земля 22 раза попадала в высокоскоростные потоки, когда скорость солнечного ветра превышала 800 км/с в течение более чем шести часов подряд. Все эти случаи сопровождались геомагнитными бурями. В 17 из них на всей поверхности Земли регистрировались мощные геомагнитные пульсации Pc5. Как сверхскоростные потоки, так и глобальные Pc5 появляются в основном в максимуме солнечного цикла или на его спаде. Имея в виду, что каждое событие анализировалось вместе с 48-часовым интервалом, его окружающим, для анализа было отобрано 816 часов. В 350 из них критерий глобальности осцилляций удовлетворялся. Полученные результаты использовались для статистического описания свойств глобальных геомагнитных пульсаций Pc5 в сопоставлении с рядами значений параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП), а также индексов, характеризующих состояние магнитосферы. Эти данные заимствовались с вебсайта OMNI <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/ow.html>. Предварительные значения AE-индекса (после 1994 г.) были взяты с сайта Мирового центра данных МЦД-С в Киото <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>. Таким образом, мы имели две выборки данных. Первая содержала 350 строк часовых значений восьми параметров: модуля ММП $|B|$, вертикальной составляющей ММП B_z , плотности плазмы СВ N , скорости

СВ V_{sw} , межпланетного электрического поля $E = -V_{sw}B_z$ и набора геомагнитных индексов K_p , D_{st} и AE для тех часовых интервалов, когда наблюдались глобальные Pc5. Другая, фоновая, выборка содержала 7888 наборов часовых значений тех же параметров, но для всех часовых интервалов 1991, 1994, 1998 и 2000–2005 гг. – тех лет, когда имелось хотя бы одно событие глобальных Pc5 в течение года.

Характеристики колебаний

Обычно спектр Pc5 имеет несколько пиков (гармоник), которые повторяются от станции к станции с небольшими вариациями. Типичная картина такой гармонической структуры на одной меридиональной цепочке станций показана на рис. 2. Цифры 1–4 показывают номер гармоники. Положение цифры по высоте показывает конкретное значение частоты гармоники на данной широте.

На рис. 3 показаны примеры меридиональных амплитудных профилей H -компоненты от северной до южной полярной шапки для всех наблюдавшихся гармоник сигнала Pc5. Профиль 9 мая 2003 г. приме-

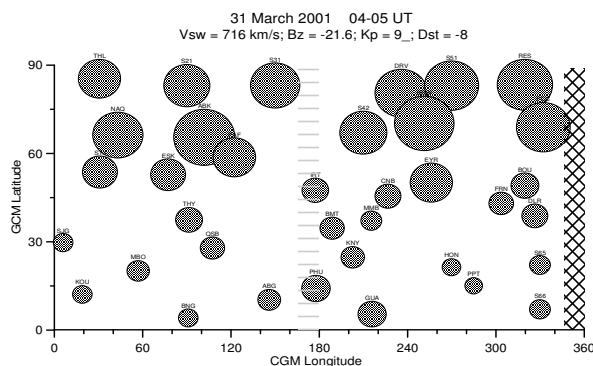


Рис. 1. Пример пространственного распределения интенсивности глобальных колебаний Pc5 вдоль поверхности Земли в исправленных геомагнитных координатах для события 31 марта – 1 апреля 2001 г. Площадь кружков пропорциональна амплитуде колебаний. Вверху указаны значения параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов. Штрихованные вертикальные полосы обозначают местный магнитный полдень (в центре) и полночь (справа).

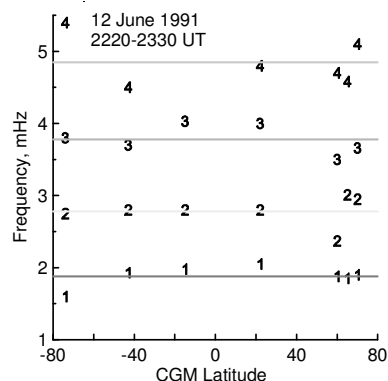


Рис. 2. Гармоническая структура Pc5 вдоль меридиональной цепочки станций. Цифры 1–4 показывают номер гармоники. Положение цифры по высоте показывает конкретное значение частоты гармоники на данной широте.

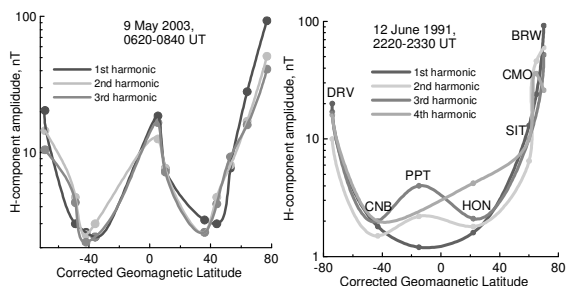


Рис. 3. Примеры меридиональных амплитудных профилей H -компоненты от северной до южной полярной шапки для всех наблюдавшихся гармоник сигнала Pc5 во время событий 9 мая 2003 г. и 12 июня 1991 г.

чателен своим очень интенсивным приэкваториальным усилением. Амплитуда Pc5 по всем трем гармоникам на экваториальной станции AAE почти равна амплитуде колебаний на высокоширотных станциях SOD и AIA. Интересно, что повышение амплитуды вблизи магнитного экватора не всегда наблюдается одновременно для всех гармоник сигнала. Так, для события 12 июня 1991 г. приэкваториальное усиление очевидно для второй и третьей гармоник, отсутствует для первой и спорно для четвертой.

На рис. 4, а мы построили распределение максимальных значений амплитуды пульсаций на всех станциях для всех наблюдавшихся гармоник. Длинный хвост, вытянутый до 220 нТл, показывает, что заметная часть колебаний имеет интенсивность, сравнимую с интенсивностью суббури. Наиболее мощное и впечатляющее событие Pc5 произошло 30–31 октября 2003 г. Оно продолжалось около 42 ч. Амплитуда H -компоненты на средних широтах достигала 150 нТл.

На рис. 4, б показано распределение значений частоты, включая все наблюдавшиеся гармоники. Из графика видно, что наименьшие гармоники, как правило, наиболее интенсивны. Гармоническая структура не очевидна здесь вследствие широкого усреднения по широте и магнитосферным условиям.

Типичные условия в солнечном ветре и магнитосфере

Здесь мы переходим к результатам, полученным при анализе двух выборок, описанных выше. Используя эти выборки, мы построили распределения ключевых параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов в течение часовых интервалов, содержащих колебания, и сравнили их с фоновыми распределениями тех же параметров.

Как и следовало ожидать, наиболее сильно отличаются распределения значений скорости солнечного ветра (рис. 5, а). Медианное значение фонового распределения (433 км/с) почти в два раза меньше соответствующего значения для распределения V_{sw} в присутствии глобальных колебаний. Это еще раз подтверждает то, что активность геомагнитных пульсаций Pc5 сильно зависит от скорости СВ — факт, отмеченный в ряде работ [6, 7]. Характерные значения других параметров межпланетной среды меняются во время генерации Pc5 в гораздо меньшей степени. Особенно это относится к плотности

плазмы СВ (рис. 5, б). Что касается модуля ММП (рис. 5, в), то его распределение в часовые интервалы, содержащие глобальные колебания, более размыто за счет большего содержания высоких значений магнитного поля, что объясняется тем, что высокоскоростные потоки СВ содержат обычно магнитные области — структуры с сильно сжатым магнитным полем. То же относится и к распределениям B_z -компоненты ММП (рис. 5, г), но здесь интересно то, что медианное значение для обоих распределений очень близко к нулю. Это говорит о независимости механизма генерации Pc5 от процессов, связанных с магнитным пересоединением в головной части магнитосферы, для которых необходимым условием является наличие отрицательной компоненты B_z .

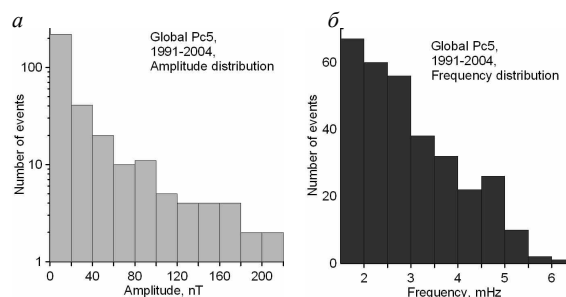
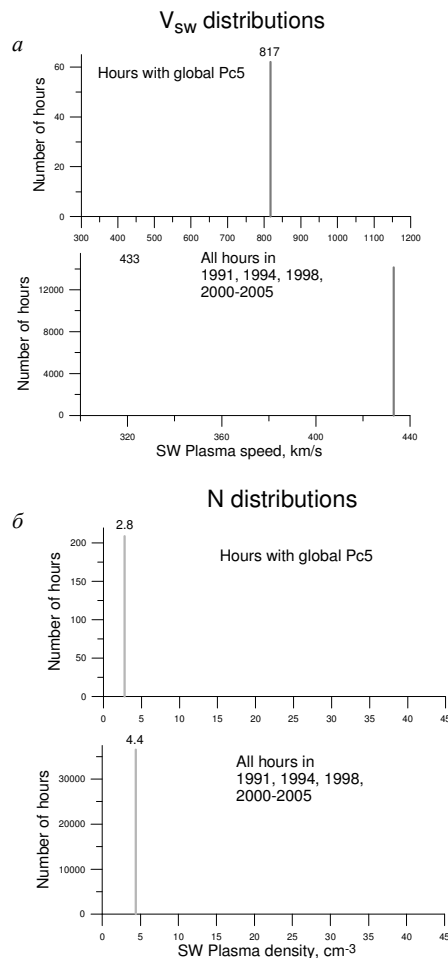


Рис. 4. Распределение максимальных значений амплитуды пульсаций (а) и несущей частоты колебаний (б).



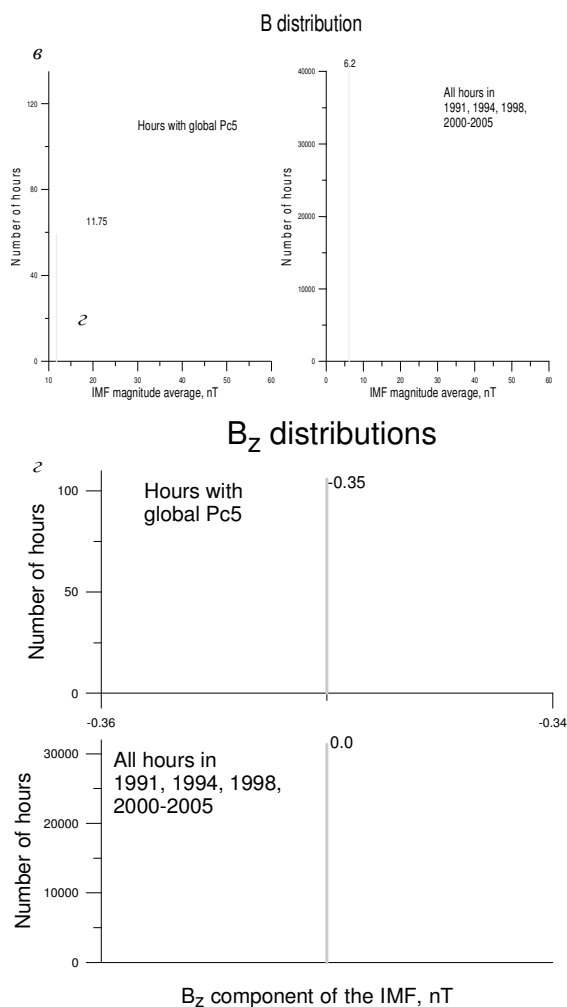


Рис. 5. Сравнение распределений параметров СВ и ММП, построенных для часовых интервалов, содержащих глобальные Pc5 (верхние панели), с фоновыми распределениями тех же параметров: *a* – скорость солнечного ветра, *б* – плотность межпланетной плазмы, *в* – модуль ММП, *г* – вертикальная компонента ММП.

Распределение геомагнитных индексов, характеризующих состояние магнитосферы во время ее крупномасштабных колебаний, типично для сильных магнитных возмущений (рис. 6, *a–в*). Медианные значения распределений K_p и AE в присутствии глобальных Pc5 почти в три раза превышают соответствующие величины фоновых распределений. Распределение D_{st} для часов, содержащих Pc5, отличается от фонового распределения длинным «хвостом» больших отрицательных значений, но максимум его не смещается. Это связано с тем, что колебания наблюдаются не только в главную фазу магнитной бури, но и на ее восстановительной фазе, когда D_{st} -индекс (но не K_p и AE -индексы) возвращается к спокойным значениям.

Глобальные Pc5 и магнитная возмущенность

На наш взгляд, есть определенное противоречие между рис. 6, *г* и 7, *б*. С одной стороны, первый из них, как уже отмечалось, говорит о том, что глобальные колебания магнитосферы никак не связаны с процессом пересоединения на дневной магнито-

паузе. С другой стороны, значительно более высокие значения индекса AE при появлении глобальных Pc5 (рис. 6, *б*) говорят о существенном дополнительном поступлении энергии в полярную ионосферу в эти часы. Этот процесс обычно связывается с работой межпланетного электрического поля, и он может протекать лишь при отрицательных значениях вертикальной

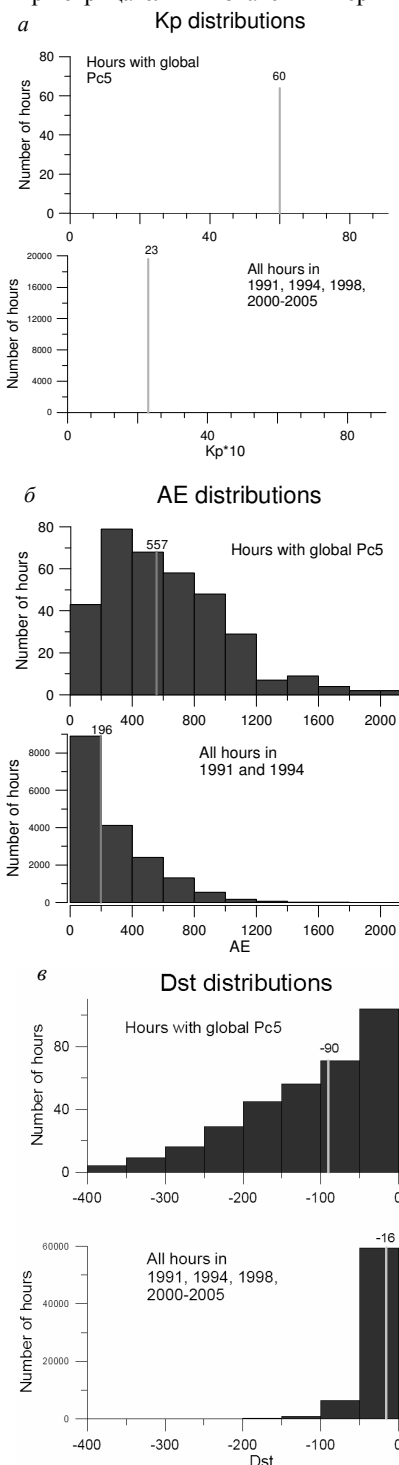


Рис. 6. Сравнение распределений геомагнитных индексов, вычисленных для часовых интервалов, содержащих глобальные Pc5 (верхние панели), с фоновыми распределениями тех же индексов: *a* – планетарный индекс K_p , *б* – авральный индекс AE , *в* – индекс интенсивности кольцевого тока D_{st} .

компоненты ММП, обеспечивающей пересоединение межпланетного и земного магнитных полей в головной части магнитосферы. Такое несоответствие наводит на мысль, не являются ли осцилляции магнитосферы сами по себе дополнительным меха-

низмом, обеспечивающим передачу энергии солнечного ветра внутрь магнитосферы и в полярную ионосферу? Накопленный нами материал наблюдений позволяет проверить это предположение.

В самом грубом приближении можно считать, что индекс AE связан с величиной межпланетного электрического поля следующим соотношением:

$$\begin{cases} AE = 0, & \text{если } E \leq 0, \\ AE = kE + c, & \text{если } E > 0. \end{cases}$$

Постоянные k и c могут быть определены из сопоставления рядов индекса AE и величины межпланетного электрического поля. В нашем случае $k = 108.2$, $c = 262.1$. Используя приведенные выше формулы, мы вычислили ожидаемые значения индекса AE_{est} для двухсуточных интервалов найденных нами событий $Pc5$ и нашли разность $\Delta AE = AE - AE_{est}$. Положительные значения ΔAE соответствуют избыточному поступлению энергии в полярную ионосферу по сравнению с уровнем, обеспечиваемым работой межпланетного электрического поля. На рис. 7 показаны примеры одновременных вариаций ΔAE и интенсивности $Pc5$ для четырех событий. Здесь в качестве интенсивности было взято среднее значение амплитуд, измеренных на противоположных меридианах, т. е. тех амплитуд, которые ранее использовались для проверки критерия глобальности колебаний. На рисунках отложены сглаженные методом бегущего среднего вариации интенсивности. Видно, что от события к событию картина меняется. Так, если во время бурь декабря и мая 2003 г. и марта 2004 г. наблюдается лишь общее соответствие избытка AE и интенсивности колебаний, то для события января 2005 г. имеется очень высокая корреляция между двумя переменными. В любом случае, связь вариаций ΔAE с изменениями интенсивности $Pc5$ очевидна. Это говорит о том, что либо сами глобальные колебания являются тем дополнительным фактором, который обеспечивает перенос энергии в полярную ионосферу, либо их генерация тесно связана с этим неизвестным фактором.

Обсуждение

Какова причина сильных различий между классическими и глобальными пульсациями $Pc5$? По нашему мнению, основная причина кроется в источнике колебаний. Импульсы динамического давления солнечного ветра генерируют волновые МГД-моды во внешней магнитосфере, которые, в свою очередь, вызывают классические $Pc5$ путем раскачки альфвеновских резонансов силовых линий [4]. Что касается глобальных колебаний $Pc5$, они требуют для своей генерации более мощного стабильного и долговременного источника энергии, чем неоднородности солнечного ветра. На наш взгляд, хорошо развитая неустойчивость границы магнитосферы может играть роль такого источника. Хорошо известно, что, как правило, высокая скорость солнечного ветра обеспечивает высокие инкременты различных типов неустойчивости пограничного слоя. Как показывают наши результаты [8], в 70 % случаев высокоскоростных потоков солнечного ветра генерировались глобальные колебания $Pc5$.

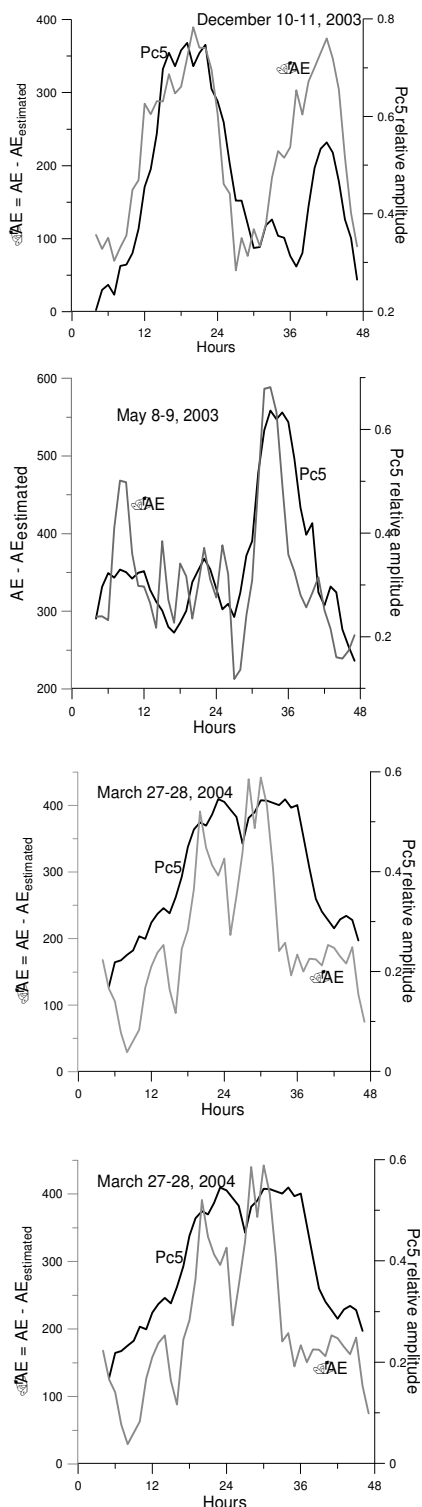


Рис. 7. Примеры одновременных вариаций избыточности индекса AE и сглаженных вариаций нормированной амплитуды $Pc5$ для четырех событий (см. текст).

Столь мощная волновая активность на границе магнитосферы не может не влиять на процессы переноса энергии через магнитопаузу. Взаимосвязь вариаций избыточности индекса *AE* и интенсивности магнитосферных колебаний показывает, что, по-видимому, при достаточно высоких скоростях солнечного ветра включается дополнительный механизм переноса. Он может называться вязким взаимодействием или волновым каналом передачи энергии, но в любом случае один механизм магнитного пересоединения сам по себе уже не может обеспечить наблюдаемый уровень поступления энергии в полярную ионосферу.

Представленные здесь результаты могут быть основой для дальнейшего исследования физических механизмов генерации и распространения глобальных колебаний Pc5 и их роли в процессах взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой во время мощных возмущений солнечно-магнитосферной системы.

В заключение мы хотим обратить особое внимание на возможность нелинейных эффектов, которые могут вызываться столь мощными МГД-волнами, какими являются глобальные Pc5, рассмотренные здесь. Эти эффекты не ограничиваются ускорением МэВ-ных электронов [3]. На синхронной орбите величина магнитного поля, связанного с волной Pc5, достигает 50 % полного магнитного поля в этой области магнитосферы [5]. Нелинейные эффекты неизбежны в этом случае. В качестве примера таких эффектов можно упомянуть ponderomotive силы, которые способны существенно перераспределять плазму в магнитосфере (см., например, [9]).

Работа была выполнена в рамках программы № 16 Президиума РАН и частично поддержана грантами РФФИ 06-05-64143 и 07-05-00696, а также грантом ИНТАС 06-1000013-8823.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baker D.N., et al. Coronal mass ejections, magnetic clouds, and relativistic magnetospheric electron events: ISTP // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, Is. A8. P. 17279–17292.
2. Hudson M.K., et al. Simulation of radiation belt dynamics driven by solar wind variations // *Sun–Earth Plasma Connections* / Eds. J.L. Burch, et al. 1999. *Geophys. Monograph. Ser. AGU.* V. 109. P. 171–182.
3. Mathie R.A., Mann I.R. A correlation between extended intervals of ULF wave power and storm-time geosynchronous relativistic electron flux enhancements // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. P. 3261–3264.
4. Mathie R.A., Mann I.R., Menk F.W., Orr D. Pc5 ULF pulsations associated with waveguide modes observed with the IMAGE magnetometer array // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. P. 7025.
5. Potapov A., Guglielmi A., Tsegmed B., Kultima J. Global Pc5 event during 29–31 October 2003 magnetic storm // *Adv. Space Res.* 2006. V. 38. P. 1582–1586.
6. Mathie R.A., Mann I.R. On the solar wind control of Pc5 ULF pulsation power at mid-latitudes: Implications for MeV electron acceleration in the outer radiation belt // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 29783.
7. Engebretson M., Glassmeier K.-H., Stellmacher M., et al. The dependence of high-latitude Pc5 wave power on solar wind velocity and on the phase of high-speed solar wind streams // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 26271.
8. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Tsegmed B. Global Pc5 oscillations in 22–23 solar cycles // *Magnetospheric Response to the Solar Extreme Events. Proceedings of the Second International Symposium “Solar Extreme Events. Fundamental Science and Applied Aspects”*. Nor-Amberd, Armenia. 26–30 September 2005. Cosmic Ray Division, Alikhanyan Physics Institute. Yerevan. 2006. P. 93–95.
9. Guglielmi A., Lundin R. Ponderomotive upward acceleration of ions by ion cyclotron and Alfvén waves over the polar regions // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 13219.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск