

СУББУРИ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗЛИЧНЫМИ ПОТОКАМИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

¹И.В. Дэспирак, ¹А.А. Любчик, ¹А.Г. Яхнин, ¹Б.В. Козелов, ²Х.К. Биернат

SUBSTORMS ASSOCIATED WITH DIFFERENT FLOWS IN THE SOLAR WIND

I.V. Despirak, A.A. Lyubchich, A.G. Yakhnin, B.V. Kozelov, H.K. Biernat

Исследовались суббуревые возмущения в периоды магнитных облаков (МС – magnetic clouds) и рекуррентных потоков солнечного ветра. Показано, что суббури, связанные с магнитными облаками (МС), начинаются на более низких широтах, чем суббури, связанные с рекуррентными потоками. Долготный размер авроральной выпуклости больше, а широтный – меньше для суббурь в периоды МС. Влияние параметров солнечного ветра (скорости солнечного ветра V и южной компоненты межпланетного магнитного поля B_z) на развитие выпуклости различно. Во время рекуррентных потоков возрастание V и B_z приводит к возрастанию средней максимальной широты суббури. Во время МС рост V и B_z приводит к тому, что в среднем максимальная широта суббури уменьшается. Мы предположили, что эти различия можно объяснить различной конфигурацией хвоста магнитосферы в периоды бурь и во время «небуревых» интервалов. Полученные результаты согласуются с некоторыми работами, демонстрирующими, что предпочтительными условиями для появления суббурь на высоких широтах являются рекуррентные потоки солнечного ветра, которые преимущественно наблюдаются на спаде и в период минимума солнечной активности.

Substorm disturbances are investigated at periods of magnetic clouds (MC) and recurrent solar-wind flows. The substorms associated with MC are shown to commence at lower latitudes than those related to recurrent flows. The longitudinal size of the auroral bulge is bigger, and the latitudinal one is smaller for the substorms at MC periods. The influence of solar-wind parameters (solar wind velocity V and south component of the interplanetary magnetic field B_z) on development of the bulge is different. During recurrent fluxes, V and B_z increase results in increase of the mean maximal latitude of the substorm. During MC, V and B_z increase leads to decrease of the maximal latitude of the substorm. We assume that these discrepancies may be explained by different configuration of the magnetospheric tail during storms and quiet intervals. The research results agree with some works, which demonstrate that preferred conditions for occurrence of substorms at the high latitudes are recurrent solar-wind flows, which are observed for the most part in decay and minimum phases of solar activity.

Введение

Потоки солнечного ветра (СВ) в зависимости от типа солнечной активности имеют различную природу. Обычно наблюдаются как рекуррентные потоки из корональных магнитных дыр, так и спорадические потоки, связанные с корональными выбросами массы (КВМ) [1]. В зависимости от фазы цикла солнечной активности преобладают потоки определенной природы [2, 3]. В минимуме солнечного цикла – это рекуррентные потоки, в максимуме цикла – потоки, связанные с КВМ, которые вблизи Земли наблюдаются обычно как магнитные облака (МС) [4]. Вклад потоков СВ в геомагнитную активность довольно высок, он составляет примерно 80 % (по измерениям aa-индекса) и также зависит от фазы цикла солнечной активности. Во время солнечного минимума вклад высокоскоростных рекуррентных потоков составляет ~70 %, во время максимума ~30 %. Вклад потоков, связанных с КВМ, ~ 50 % во время максимума и <10 % после максимума активности [5].

Важной частью геомагнитной активности являются магнитосферные суббури. Известно, что вариации параметров СВ во многом определяют развитие суббуревых возмущений. Некоторые авторы предполагали, что экспансия суббури на высокие широты контролируется скоростью СВ и южной компонентой межпланетного магнитного поля (ММП) [6–9]. В то же время было показано, что «высокоширотные» суббури появляются более часто во время минимума солнечной активности [7, 10] и коррелируют с рекуррентными потоками СВ [11]. Следовательно, развитие суббуревых возмущений зависит не только от величины скорости солнечного ветра и южной компоненты ММП, но и от структуры потоков солнечного ветра.

В данной работе мы исследовали, как различные потоки СВ влияют на экспансию суббури (а именно на развитие авроральной выпуклости и суббуревых западного электроджета). Для этой цели данные по оптическим наблюдениям развития суббури со спутника «Polar» и данные наземных наблюдений цепочки геомагнитных станций IMAGE были сопоставлены с данными по межпланетным параметрам со спутника WIND.

Данные

Развитие авроральной выпуклости изучалось на основе данных прибора UVI спутника «Polar» LLBL эмиссии (λ 1600–1800 Å). Размер авроральной выпуклости определялся по определенному уровню свечения, который на 3–5 $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ превышал уровень свечения овала. Обычно это соответствовало уровню потока 10–25 $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. По выбранному уровню светимости определялись начальная и максимальная широты, а также широтный и долготный размеры выпуклости. Начальная широта определялась по нижней границе пятна свечения в момент начала суббури, максимальная – как максимальная широта полярной границы выпуклости в момент ее максимального развития. Развитие суббуревых западного электроджета контролировалось с помощью меридионального профиля электроджета, построенного с использованием данных сети магнитометров IMAGE (<http://www.ava.fmi.fi/MIRACLE/>). Положение полярного края суббуревых западного электроджета по профилю определялось как положение изолинии западного тока, которая превышает на 20 % уровень интенсивности западного тока перед суббурей, а центр западного электроджета – как положение западного тока максимальной интенсивности.

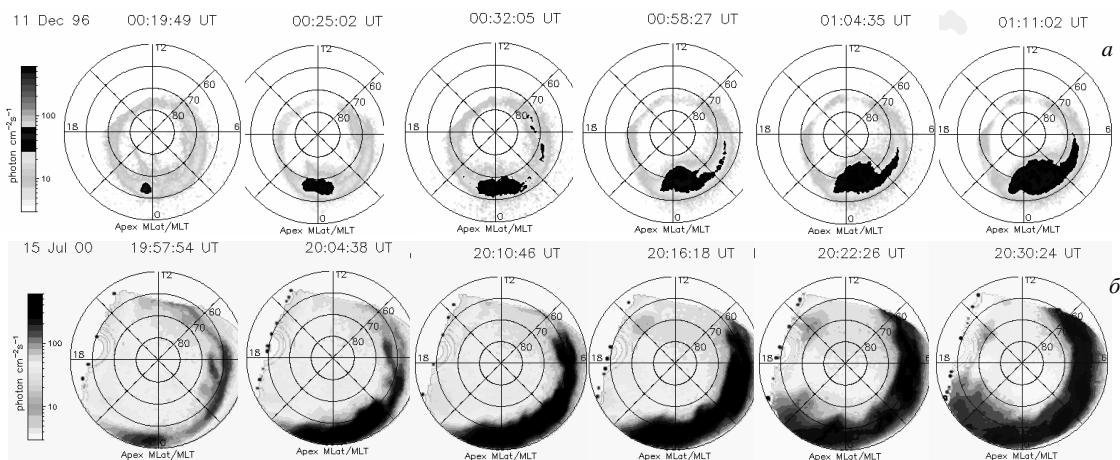


Рис. 1. Пример развития авроральной выпуклости во время прохождения рекуррентного потока (а) и во время магнитного облака (б).

Поступление энергии и магнитного потока в магнитосферу определяется параметрами СВ. В качестве параметров СВ, влияющих на развитие суббури, были выбраны скорость СВ V_x и величина южной компоненты B_z ММП, усредненные за два часа до максимальной стадии суббури. Этот интервал усреднения был выбран, потому что параметры СВ контролируют поступление энергии (потока) в магнитосферу как во время предварительной, так и во время взрывной фазы суббури. Использовались данные приборов SWE и MFI спутника WIND с одноминутным разрешением.

Рекуррентные потоки характеризуются длительностью в несколько дней, повышенной скоростью СВ ($V_x > 500$ км/с), относительно низкой плотностью [1]. Мы рассмотрели рекуррентные потоки, которые наблюдались в декабре 1996 г. Во время прохождения рекуррентных потоков были отобраны суббури, когда были доступны данные со спутника «Polar» (31 случай).

КВМ связаны с магнитными облаками в СВ [4, 12]. МС характеризуются повышенной напряженностью магнитного поля, относительно низкой плотностью плазмы, высоким отношением магнитного давления к ионному тепловому давлению, а также вращением вектора магнитного поля параллельно плоскости, которая сильно наклонена к плоскости эклиптики [4]. Перед магнитным облаком, на его фронте наблюдается область взаимодействия облака с невозмущенным СВ (Sheath). Список МС за 2000 г. был взят с сайта: http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_pub1.html. Были рассмотрены все доступные данные спутника «Polar» во время МС за 2000 г. (12 случаев).

Результаты

На рис. 1 представлены примеры развития авроральной выпуклости во время различных потоков СВ. На рис. 1, а показан пример формирования суббуревой авроральной выпуклости во время прохождения рекуррентного потока СВ. Это случай является примером высокоширотной суббури 11 декабря 1996 г. Полярная кромка выпуклости наблюдалась на 77.3° CGLAT, широтный размер выпуклости $\sim 16^\circ$, ее долготный размер $\sim 80^\circ$, соотношение между долготным и

широтным размером выпуклости в момент максимального развития суббури составляет $L_d / L_F = 4.9$.

На рис. 1, б показан пример развития авроральной выпуклости во время прохождения МС 15 июля 2000 г. Это пример развития суббури при экстремально высоких значениях параметров СВ ($V_x \sim 900$ км/с, усредненная за 2 ч B_z ММП ~ -31 нТл), причем развитие выпуклости происходит на главной фазе бури ($D_{st} \sim -198$). Видно, что авроральная выпуклость формируется на очень низких геомагнитных широтах. Начальная широта $\sim 50.33^\circ$ CGLAT, максимальная широта полярной кромки выпуклости 68.67° CGLAT, широтный размер $\sim 18^\circ$, долготный размер 289° . Соотношение между долготным и широтным размерами равно $L_d / L_F = 15.2$. Это отношение в 3 раза больше, чем для типичного примера развития суббури во время рекуррентного потока (рис. 1, а).

Примеры развития суббуревой западного электроджета для разных потоков СВ представлены на рис. 2. На рис. 2, а показан меридиональный профиль западного электроджета, построенный по данным системы MIRACLE, для суббури во время рекуррентного потока 15 декабря 1996 г. Полярная кромка западного электроджета в момент максимального развития суббури достигает 75.5° CGLAT, при этом центр электроджета (область максимального тока) наблюдался на 73.8° CGLAT.

На рис. 2, б показан пример меридионального профиля западного электроджета во время МС 7 ноября 2000 г. Видно, что развитие электроджета происходит на низких широтах. Полярная кромка электроджета в момент максимального развития суббури наблюдается на $\sim 66^\circ$ CGLAT, а центр западного электроджета – на 64.3° CGLAT. Эти типичные примеры показывают, что во время прохождения МС развитие суббуревой электроджета происходит на более низких широтах, чем во время рекуррентного потока.

Зависимости начальной и максимальной широт авроральной выпуклости от параметров СВ показаны на рис. 3. Слева представлены зависимости от B_z ММП, справа – от V_x . На верхней панели рис. 3, а показаны зависимости для рекуррентных потоков, на нижней панели 3, б – для МС. Как видно из рисунка,

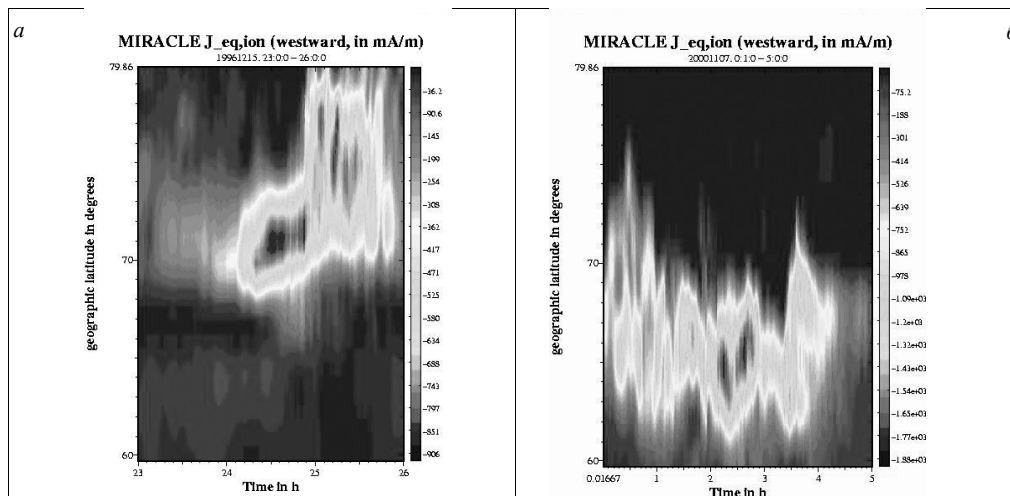


Рис. 2. Пример развития суббурового западного электроджета во время высокоскоростного потока (а) и во время магнитного облака (б).

во время рекуррентных потоков авроральная выпуклость формируется на более высоких широтах, чем во время МС. Во время рекуррентных потоков максимальная широта выпуклости возрастает с увеличением B_s и V_x , в то время как начальная широта выпуклости уменьшается. Напротив, во время МС максимальная широта выпуклости не возрастает, а даже уменьшается с ростом этих межпланетных параметров. Начальная широта также уменьшается.

Сравним широтный и долготный размеры авроральной выпуклости для суббурь, наблюдавшихся при разных потоках СВ. На рис. 4 показаны размеры авроральной выпуклости для каждой наблюдавшейся суббури. На рис. 4, а представлены размеры выпуклости для рекуррентных потоков, на рис. 4, б – размеры выпуклости для суббурь во время МС. Сплошной вертикальной линией показано среднее значение, прерывистой вертикальной линией – медианное значение. Кроме того, мы рассчитали

отношение долготного размера выпуклости широтному: для рекуррентных потоков это отношение представлено на рис. 4, в, для МС – на рис. 4, е. Видно, что во время рекуррентных потоков СВ широтный размер выпуклости в среднем больше, чем во время МС. Это соотношение меняется на противоположное для долготного размера – среднее значение выше для МС. Зависимости становятся более явными при рассмотрении отношения долготного размера выпуклости к широтному: для МС оно более стабильно и существенно больше, чем для рекуррентных потоков.

Обсуждение

На основе сравнения авроральных наблюдений спутника «Polar» и спутника «Geotail» в магнитном хвосте, авторы [13, 14] сделали вывод о том, что полярная кромка авроральной выпуклости проектируется в окрестность околоземной нейтральной линии. Это говорит о том, что пересоединенный магнитный поток в магнитном хвосте равен потоку через авроральную выпуклость, т. е. пропорционален площади выпуклости. [15] продемонстрировали, что поток через выпуклость (пересоединенный поток) равен потоку, накопленному в хвосте перед началом взрывной фазы суббури. В то же время накопленный поток пропорционален электрическому полю пересоединения в СВ. В работе [16] показано, что при одинаковых значениях электрического поля пересоединения и B_s , площадь авроральной выпуклости примерно одинакова для периода солнечного минимума и максимума. Кроме того, как показано в данной работе, суббури во время прохождения МС начинаются на более низких широтах, чем при рекуррентных потоках (рис. 3, см. также [16, 17]). Этот факт вместе с равенством площади выпуклости при одинаковых значениях B_s и V объясняет отсутствие «высокоширотных суббурь» во время прохождения МС по сравнению с рекуррентными потоками. Однако для МС характерны обычно экстремально большие значения B_s , которые нетипичны для рекуррентных потоков, им должны соответствовать

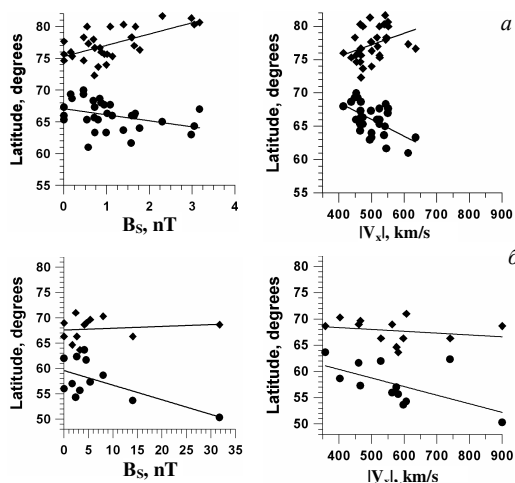


Рис. 3. Зависимости начальной и максимальной широт авроральной выпуклости от южной компоненты B_s ММП и скорости V_x солнечного ветра во время рекуррентных потоков (а) и во время магнитных облаков (б).

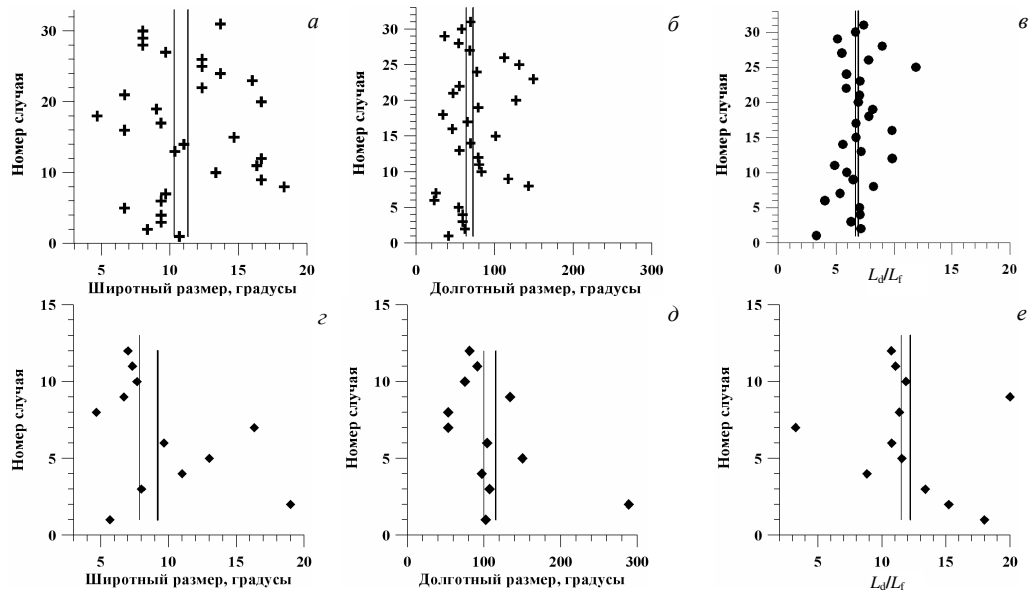


Рис. 4. Широтный (а и с) и долготный (б и д) размеры авроральной выпуклости во время рекуррентных потоков (а и б) и во время магнитных облаков (с и д) и отношение долготного к широтному размеру выпуклости для магнитных облаков (е) и для рекуррентных потоков (е).

очень большие площади выпуклости. В этом случае априори неясно, почему выпуклость остается на низкой широте. Рисунок 4 может пролить свет на эту проблему. Видно, что суббури, связанные с МС, в среднем больше по долготе и меньше по широте, чем суббури, относящиеся к рекуррентным потокам. Кроме того, для суббурь, связанных с МС, отношение долготного размера выпуклости к широтному более стабильно и существенно больше, чем для суббурь при рекуррентных потоках (рис. 4).

Причина различной «геометрии» развития авроральной выпуклости может быть связана с различной конфигурацией хвоста магнитосферы во время потоков СВ различной природы. Потоки СВ, содержащие магнитные облака, наблюдаются в основном в периоды максимума солнечной активности, когда магнитное поле в приземной части ночной магнитосферы более вытянуто в хвост по сравнению с периодами минимума солнечной активности [18]. В то же время МС обычно ассоциируются с геомагнитными бурями [19]. Это относится и к МС, исследованным нами выше. На рис. 5 представлено распределение исследованных в этой работе событий во время различных потоков СВ в зависимости от D_{st} -индекса. Как следует из рис. 5, все рассмотренные нами случаи суббурь для рекуррентных потоков относятся к «небуревым» интервалам, а суббури во время МС, напротив, наблюдались во время бурь. Конфигурация магнитного хвоста во время бурь сильно отличается от «небуревой». Во время бурь магнитосферный хвост более вытянут [20] и интенсивный и тонкий токовый слой (являющийся условием магнитного пересоединения, которое, возможно, является причиной суббури) занимает более широкий, чем при «небуревых» интервалах, MLT-сектор околоземного хвоста. Как следствие, во время МС-буревых интервалов суббури может развиваться в более ши-

роком долготном секторе. При этом для развития авроральной выпуклости большой площади (что соответствует большому пересоединенному потоку) не требуется распространения авроральной выпуклости на высокие широты.

«Высокоширотные суббури» могут наблюдаться также во время прохождения области взаимодействия КВМ /спокойный солнечный ветер (Sheath). Однако это не дает значительного вклада в картину наблюдения высокоширотных суббурь в период максимума солнечной активности [10], так как длительность таких интервалов мала по сравнению с длительностью магнитных облаков.

Данные спутников «Polar» и WIND получены с официальных сайтов приборов UVI, SWE, MFI в Интернете (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp.public/>;

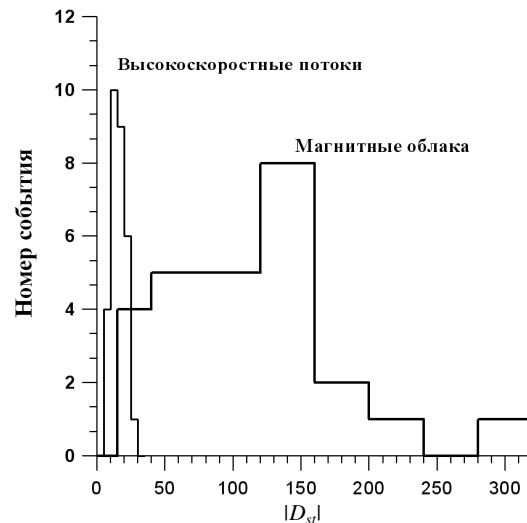


Рис. 5. Гистограммы событий по D_{st} для рекуррентных потоков и магнитных облаков.

<http://uvisun.msfc.nasa.gov/UVI/browseimages.html>).

Руководители экспериментов на этих приборах – G. Parks, K. Ogilvie, R. Lepping соответственно. Данные наземных магнитометров цепочки IMAGE взяты с официального сайта в Интернете (<http://www.ava.fmi.fi/MIRACLE>). Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, часть 3: «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pudovkin M.I. Solar wind // *Coros Educational Journal*. 1996. V. 12. P. 87–94.
2. Wang Y.-M., Sheeley Jr. Global evolution of interplanetary sector structure, coronal holes, and solar wind streams during 1976–1993: Stackplot displays based on solar magnetic observations // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 6597–6612.
3. Webb D.F., Howard R.A. The solar cycle variation of coronal mass ejections and solar wind mass flux // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 4201–4313.
4. Burlaga L.F., Klein L., Sheeley Jr., et al. Magnetic cloud and a coronal mass ejection // *Geophys. Res. Lett.* 1982. V. 9, N 12. P. 1317–1320.
5. Richardson I.G., Gliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 18203–18213.
6. Gussenhoven M.S. Extremely high latitude auroras // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 2401–2412.
7. Дмитриева Н.П., Сергеев В.А. Появление авроральной электроструи на широтах полярной шапки: характеристики явления и возможность его использования для диагностики крупномасштабных высокоскоростных потоков солнечного ветра // *Магнитосферные исследования*. 1984. № 3. С. 58–66.
8. Weatherwax A.T., Rosenberg T.J., MacLennan C.G., Doolittle J.H. Substorm precipitation in the polar cap and associated Pc 5 modulation // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24, N 5. P. 579–582.
9. Zverev V.L., Starkov G.V., Feldstein Ya.I. Influences of the interplanetary magnetic field on the auroral dynamics // *Planet. Space Sci.* 1979. V. 27. P. 665–667.
10. Дэспирак И.В., Любич А.А., Биернат Х.К., Яхнин А.Г. Полярная экспансия суббуревого западного электроджета в зависимости от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2008. В печати.
11. Сергеев В.А., Яхнин А.Г., Дмитриева Н.П. Суббури в полярной шапке – эффект высокоскоростных потоков солнечного ветра // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1979. Т. 19, № 6. С. 1121–1122.
12. Klein L.M., Burlaga L.F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. P. 613–624.
13. Yahnin A.G., Despirak I.V., Lubchich A.A., Kozelov B.V., et al. Relationship between substorm auroras and processes in the plasma sheet // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 122. P. 97–106.
14. Yahnin A.G., Despirak I.V., Lubchich A.A., et al. Indirect mapping of the plasma sheet flow reversal region onto the auroral display // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 679–687.
15. Shukhtina M.A., Dmitrieva N.P., Popova N.G., et al. Observational evidence of the loading-unloading substorm scheme // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L17107. doi:10.1029/2005GL023779.
16. Yahnin A.G., Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kozelov B.V. Solar wind control of the auroral bulge expansion // *Proceedings of the 7th International Conference on Substorms*. Helsinki, 2004. P. 31–34.
17. Gerard J.-C., Hubert B., Grard A., Meurant M. Solar wind control of auroral substorm onset locations observed with the IMAGE-FUV imagers // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. N A03208, doi: 10.1029/2003JA010129.
18. Yahnina T.A., Yahnin A.G., Yahnin D.A., et al. Long-term behavior of the magnetotail stretching // *Proc. of the XXVIII Annual Seminar. Apatity*. 2005. P. 9–12.
19. Wilson R.M. Geomagnetic response to magnetic clouds // *Planet. Space Sci.* 1987. V. 35. P. 329–335.
20. Pulkkinen T.I., Ganushkina N.Y., Tanskanen E.I., et al. Magnetospheric current systems during stormtime sawtooth events // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, N A11S17. doi:10.1029/2006JA0101627.

¹Полярный геофизический институт, КНЦ РАН, Мурманск

²Институт космических исследований, Грац, Австрия