

ВАРИАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В МАГНИТОАКТИВНЫЕ ПЕРИОДЫ

VARIATIONS OF PHYSICAL CHARACTERISTICS OF EARTH PLASMOSPHERE IN MAGNETOACTIVE PERIODS

Г.А. Котова, М.И. Веригин, В.В. Безруких

Институт космических исследований РАН

Thermal plasma measurements on INTERBALL 2 and its subsatellite MAGION 5 (1995-2001) are used to deduce proton temperature and density distributions in the Earth's plasmasphere. It is shown that inside the plasmasphere the density decreases only during strong magnetic storms. Alternatively, at least on the night side, small storms often result in density increase inside the plasmasphere, while plasmapause approaches the Earth. A study of the temperature behavior during moderate magnetic storm development revealed that in the inner plasmasphere ($L < 2.8$) night time ion temperature was depressed in the storm main phase, but exceeded quiet time values in the storm recovery phase. Low temperatures during storm main phase are possibly connected to reverse fluxes from the ionosphere to plasmasphere at late dusk or night. The enhanced temperature in the recovery phase of a storm is naturally explained by interaction of cold plasmaspheric plasma with the energetic ring current particles.

Proton temperatures in the plasmasphere are compared along the magnetic field lines to electron and ion temperatures measured by DMSP satellites in the upper (~ 840 km) ionosphere.

The work was partially supported by Programs P16/2 and OFN 16 of Russian Academy of Sciences.

Введение

Несмотря на многолетнюю историю исследования плазмосферы Земли, изменения ее параметров во время развития геомагнитной бури исследованы плохо. И в экспериментальных и в теоретических работах исследовалось скорее движение границы плазмосферы – плазмопаузы во время бури и зависимость параметров плазмосферной плазмы от индекса магнитной активности – Кр или фазы солнечного цикла [напр., 3, 8]. Принято считать, что плотность холодной плазмы в плазмосфере падает во время развития главной фазы бури и затем постепенно восстанавливается.

Измерения температуры плазмы в плазмосфере проводились гораздо реже, чем измерения плотности, и массив экспериментальных данных по тепловой структуре плазмосферы весьма ограничен. Наиболее подробно изучена динамика температуры утреннего и вечернего секторов плазмосферы по данным масс-спектрометра с тормозящим потенциалом RIMS, работавшего на спутнике DE-1. Надежной зависимости температуры от индексов геомагнитной активности не выявлено, что, вероятно, связано с достаточно быстрой реакцией температуры (от нескольких минут до часа) на внезапное включение или выключение источника тепла [4].

В настоящей работе будут рассмотрены изменения плотности и температуры холодной плазмы в плазмосфере Земли во время развития магнитных бурь по данным космического аппарата ИНТЕРБОЛ-2 (1996г.) и его субспутника МАГИОН-5 (1999-2000г.г.).

Экспериментальные данные

На борту космического аппарата ИНТЕРБОЛ-2 для измерения тепловой плазмы был установлен экспериментальный комплекс Альфа-3, включающий модуляционный анализатор ПЛ-19. Энергетические спектры в диапазоне 0-25 эВ измерялись в течение 2с один раз за 15с или 280с в зависимости от телеметрической моды. Небольшой период околополярной орбиты спутника (6 часов) – весьма удобен для анализа влияния магнитной активности на динамику характеристик плазмосферы.

Субспутник ИНТЕРБОЛ'а-2 МАГИОН-5 начал свою активную работу только после окончания работы основного аппарата. Данные по тепловой плазме были получены

с помощью анализатора с тормозящим потенциалом ПЛ-48. Энергетические спектры измерялись в течение 0.4с каждые 8с. К сожалению, данные имеются в основном только с нисходящей части орбиты 1 раз за сутки.

Ранее аналогичные данные по тепловой плазме, полученные на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1 с помощью прибора ПЛ-48 сравнивались с данными масс-спектрометра с тормозящим потенциалом RIMS, работавшего на космическом аппарате DE-1 [7] Хорошее согласие данных подтверждает надежность измерений на космических аппаратах проекта ИНТЕРБОЛ.

Изменение плотности и температуры протонов плазмосферы во время развития магнитных бурь

При развитии магнитной бури в магнитосфере Земли изменения параметров плазмосферы наблюдаются в первую очередь в околополуночном секторе [6-8].

На рис.1 показаны распределения плотности и температуры протонов, полученные на ИНТЕРБОЛ'е-2 при последовательных, через ~ 6 часов, пролетах спутника через плазмосферу во время развития небольшой магнитной бури. Первые два пересечения плазмосферы происходили при почти спокойных геомагнитных условиях, третий же раз спутник пересекал плазмосферу на главной фазе бури при минимальном значении Dst – индекса. В этом пролете наблюдалась чрезвычайно низкая температура ионов в глубине плазмосферы, однако концентрация практически не изменилась. Через 6 часов, на следующем пролете, на фазе восстановления температура ионов в ночной плазмосфере была даже выше значений, зарегистрированных ранее при спокойных условиях, и только на следующем витке регистрировалась температура, характерная для спокойных условий.

Следует подчеркнуть, что на различных пролетах спутника через плазмосферу измерения проводились в различных коротящих с Землей областях плазмосферы, разнесенных по долготе приблизительно на 90°. Нельзя сказать, что одна и та же плазма сначала охлаждалась, а затем нагревалась.

На рис. 2 показана последовательность распределений плотности и температуры протонов в зависимости от параметра L, измеренных один раз в сутки при входе спутника МАГИОН-5 в ночную плазмосферу во время развития небольшой магнитной бури. Во время развития возмущения с ростом величин Kp и AE-индексов плазмопауза приближается к Земле до $L \sim 3.1$, но обращает на себя внимание тот факт, что плотность во внутренней плазмосфере при $L < 2.8$ не уменьшается, а скорее возрастает. Небольшие узкие провалы плотности 26 сентября при $L=2.8$ и 27 сентября при $L=2.6$, вероятно, связаны с развитием узкой струи поляризационного джета на ионосферных высотах. Температура во внутренней плазмосфере минимальна при минимуме Dst-вариации и повышается на фазе восстановления бури.

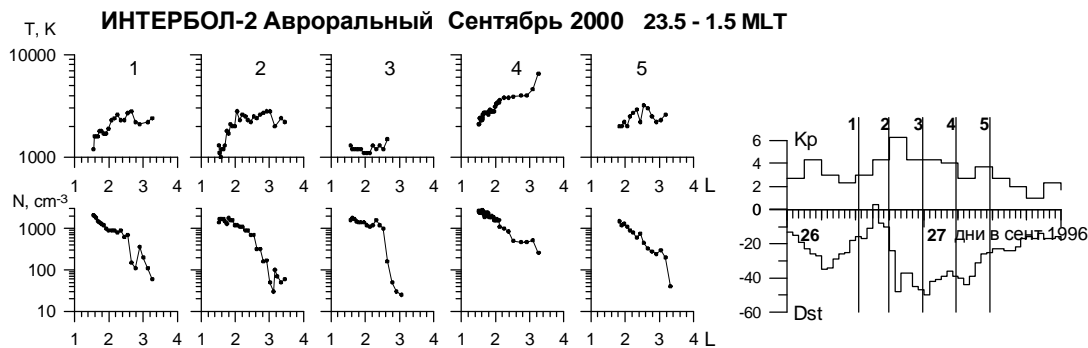


Рис.1 Плотность (внизу) и температура (вверху) тепловых протонов, измеренные на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 при последовательных через ~ 6 часов пролетах спутника через ночную плазмосферу во время развития небольшой магнитной бури. Номера на графиках соответствуют временам, отмеченным линиями на правом графике, показывающем вариации Kp и Dst - индексов.

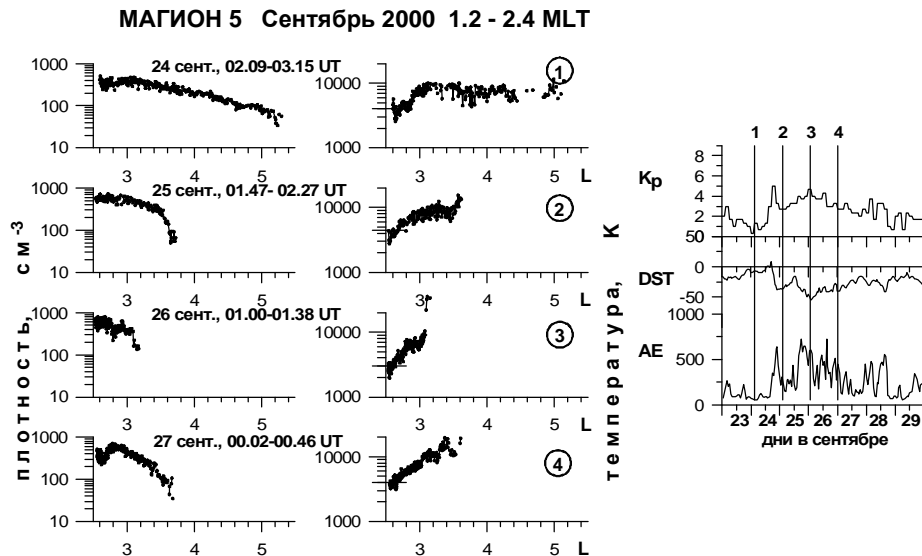


Рис.2 Плотность и температура тепловых протонов, измеренные на МАГИОНе-5 раз в сутки при пересечении ночной плазмосферы Земли во время небольшой магнитной бури. На температурных графиках отрезками прямой отмечена средняя температура при $L < 2.8$

На рис. 3 представлена статистика измерений температуры и плотности плазмосферной плазмы на спутнике МАГИОН-5 в ночной части внутренней плазмосферы (21.8 – 3.0 MLT) в зависимости от Kp-индекса. Несмотря на довольно скудную статистику, видно, что температура во внутренней плазмосфере уменьшается с увеличением Kp, а плотность не изменяется или немного возрастает.

Повышенные температуры на фазе восстановления магнитной бури, по-видимому, связаны с взаимодействием плазмосферной плазмы с плазмой кольцевого тока. Труднее понять, почему во время главной фазы бури во внутренней плазмосфере наблюдается холодная плазма. Возможно, это связано с потоками ионосферной плазмы в плазмосферу, обратными обычно наблюдающимся ночным потокам из плазмосферы в ионосферу.

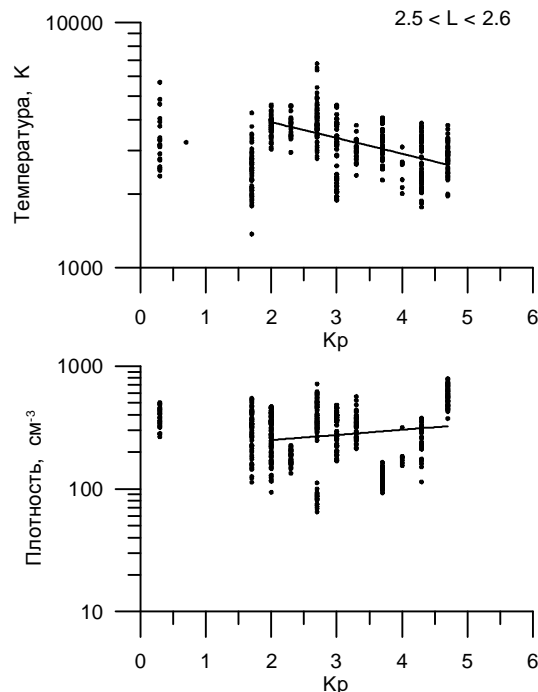


Рис.3 Температура и плотность протонов во внутренней части ночной плазмосферы Земли в зависимости от Kp – индекса, измеренные на спутнике МАГИОН-5. Тонкими линиями показаны аппроксимирующие экспоненциальные зависимости при $Kp > 2$

Обсуждение

Статистические исследования динамики температуры плазмы в плазмосфере Земли во время развития магнитных возмущений достаточно противоречивы [4]. Данные космического аппарата DE-1 указывают на то, что наиболее низкие температуры в вечернем секторе плазмосферы в диапазоне $2 < L < 3$ наблюдаются при высокой магнитной активности. Низкая и умеренная магнитная активность не оказывает влияния на температуру плазмы вечерней плазмосферы [4].

Данные, полученные на космических аппаратах ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5, во время развития небольших и умеренных магнитных бурь свидетельствуют о том, что во внутренней плазмосфере температура падает на главной фазе бури, а на фазе восстановления часто возрастает даже сверх величин, наблюдавшихся перед бурей в магнито-спокойный период. При этом плотность плазмы не уменьшается, а иногда и увеличивается.

Плазмосфера Земли является продолжением ионосферы на большие высоты (>1000 км) и, естественно, процессы ионосферно-плазмосферного обмена в первую очередь определяют динамику температуры плазмы в плазмосфере, особенно в ее внутренней области. Теоретические исследования, в основном, касаются объяснения повышенных температур во внешней «горячей» зоне плазмосферы [1]. Обычно рассматривается взаимодействие плазмы кольцевого тока с тепловой плазмосферной плазмой как в волновых процессах, так и посредством кулоновских столкновений [11] или нагрев фотоэлектронами [10].

Во время магнитных бурь обычно наблюдается образование плазмосферных плюмажей (ранее использовался термин «плазмосферный хвост»), которые тянутся от плазмосферы в послеполуденном секторе плазмосферы в солнечном направлении [5]. На восстановительной фазе бури плюмаж начинает поворачиваться на восток. Инжекция относительно горячей плазмы плазменного слоя на главной фазе создает частичный кольцевой ток с ночной стороны, максимум интенсивности которого постепенно смещается на запад [2]. На фазе восстановления холодная плазмосферная плазма и горячая плазма кольцевого тока с наибольшей вероятностью перекрываются и взаимодействуют на вечерней стороне, что, возможно, и приводит к нагреву плазмы, которая позже и наблюдается на ночной стороне. Однако при таком объяснении остается непонятным проникновение кольцевого тока на низкие L-оболочки с $L < 3$ при небольших магнитных бурях, где наблюдалось повышение температуры плазмы.

На главной фазе бури кольцевой ток достаточно узкий на ночной стороне, где одновременно происходит эрозия плазмосферы, и поэтому в этот период перекрытие этих двух образований на ночной стороне минимально, что приводит к отсутствию дополнительного источника нагрева на ночной стороне на главной фазе бури. Кроме того, Хазанов и др. [9] показали, что, по крайней мере, при $L > 3$ фотоэлектроны не являются источником нагрева плазмосферной плазмы в периоды магнитосферных бурь.

Согласно наблюдениям на спутниках серии ИНТЕРБОЛ температура плазмы во внутренней плазмосфере в период главной фазы магнитной бури ниже температуры плазмы, наблюдавшейся перед бурей. Поэтому должен существовать какой-то механизм охлаждения или замещения плазмосферной плазмы. Источником низкотемпературной плазмы может быть ионосфера на высотах области F. Низкая температура плазмы, зарегистрированная во внутренней плазмосфере во время главной фазы бури, может быть связана с суммарным потоком плазмы из ионосферы в плазмосферу, обратным обычно наблюдающемуся ночному потоку из плазмосферы в ионосферу. Отсутствие падения или возрастание плотности плазмы во внутренней ночной плазмосфере так же может быть связано с пополнением плазмосферы ионосферной плазмой или, по крайней мере, отсутствием ночного стока плазмы в ионосферу; возможна также конвекция плазмы из внешних областей ночной плазмосферы во внутренние во время магнитной бури.

Авторы благодарны Мировому центру данных по геомагнетизму в Киото (<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), за предоставление возможности использовать необходимые индексы геомагнитной активности.

Работа выполнена при поддержке программ РАН П16/2 и ОФН 16.

Список литературы

1. Грингауз К.И., Безруких В.В. Плазмосфера Земли (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т.17. С. 784-803.
2. Brandt, P. C., Ohtani, S., Mitchell, D. G., Fok, M.-C., Roelof, E. C., Demajistre, R. Global ENA observations of the storm mainphase ring current: Implications for skewed electric fields in the inner magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1994. **21**(20), doi:10.1029/2002GL015160, 2002.
3. Carpenter D.L. and Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1992. V.97. P. 1097-1108
4. Comfort, R.H., Thermal structure of the plasmasphere // *Adv. Space Res.* 1996. V.17 (10). P.175-(10)184.
5. Goldstein, J. and Sandel, B. R., The global pattern of evolution of plasmaspheric drainage plumes. In: J. L. Burch, M. Schulz, and H. Spence (Eds.), *Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging*, AGU, Washington, D. C., Doi:10.1029/2004BK000104, page 1., 2005.
6. Goldstein, J., Sandel, B.R., Forrester, W.T., Thomsen, M.F., Hairston M.R., Global plasmasphere evolution 22–23 April 2001 // *J. Geophys. Res.* 2005. 110, A12218, doi:10.1029/2005JA011282.
7. Kotova, G., Bezrukikh, V., Verigin, M., and Šmilauer, J. In situ observations of low-density regions inside the plasmasphere // *Earth, Planets and Space.* 2004. V. 56(10). P. 989-996.
8. Lemaire J.F. and Gringauz K.I. with contribution from Carpenter D.L. and Bassolo V. *The Earth's Plasmasphere*, Cambridge University Press, 1998.
9. Khazanov, G.V., Liemohn, M.W., Kozyra, J.U., Moore, T.E. Inner magnetospheric superthermal electron transport: Photoelectron and plasma sheet electron sources // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 23485-23501.
10. Khazanov, G.V. and Liemohn, M.W. Transport of photoelectrons in the nightside magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2002. 107(5), 10.1029/2001JA000163.
11. Kozyra, J.U., Shelley, E.G., Comfort, R.H., Brace, L.H., Cravens, T.E., Nagy, A.F. The role of ring current O^+ in the formation of stable auroral red arcs // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 7487-7502.