

УДК 533.951.2

ГОРЯЧАЯ ПЛАЗМА НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ: НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ

Н. А. Власова, Б. В. Марьин, С. Я. Рейзман, И. А. Рубинштейн,
Э. Н. Сосновец, М. В. Тельцов

(НИИЯФ)

E-mail: vlasova@tasped.sinp.msu.ru

Исследованы некоторые особенности угловой анизотропии потоков электронов с энергией $\sim 0.1 - 14$ кэВ как инструмента изучения динамики горячей плазмы в районе геостационарной орбиты. Экспериментальные данные, используемые в работе, были получены с 11 по 23 марта 1992 г. с ИСЗ ГОРИЗОНТ-35. Показано, что в условиях низкой геомагнитной активности потоки электронов в области геостационарной орбиты в ночном секторе магнитосферы анизотропны, а во время геомагнитных возмущений близки к изотропным.

Введение

Динамика потоков частиц в области ближнего плазменного слоя – одна из важных проблем физики магнитосферы. Экспериментальные данные, полученные на спутнике ATS-5, позволили в 1972 г. построить модель конвекции частиц в плазменном слое магнитосферы Земли [1]. Обычно рассматривается симметричная относительно меридиана утро-вечер модель движения заряженных частиц под действием магнитного поля Земли, электрического поля «утро-вечер» и поля коротации. При этом электрическое поле «утро-вечер» считается стационарным и одинаковым в исследуемой части магнитосферы. Попытки объяснить динамическое поведение плазмплаузы, основываясь на конвекционной модели, привели к необходимости введения частичной экранировки внешнего электрического поля альвеновским слоем [2]. Подбор коэффициента экранировки продолжается до настоящего времени [3].

Исследование конвекции заряженных частиц в магнитосфере Земли обычно разбивается на два этапа [3]:

– спокойная постоянная магнитосферная конвекция частиц плазменного слоя к Земле из ближней части магнитосферного хвоста. При этом частицы двигаются по траекториям, которые определяются зарядом частицы, энергией, питч-углом и, конечно, состоянием магнитосферного электрического поля;

– частицы инжектируются эпизодически на ночную сторону магнитосферы и затем двигаются по траекториям, согласно законам спокойной конвекции.

Однако до сих пор нет ясного понимания механизма процессов, приводящих к инжекции частиц во внутреннюю магнитосферу. Неизвестно, как проходит процесс инжекции частиц в спокойное время и является ли поток частиц из источника в хвосте стационарным или даже в спокойное время действует вспышечный механизм инжекции.

Исследование потоков большой плотности холодной плазмы в области геостационарной орбиты показало [4], что новый материал плазменного слоя поступает только в двух случаях: после продолжительного периода северной ориентации межпланетного магнитного поля и при сильном поджатии магнитосферы.

Цель настоящей работы – исследование некоторых особенностей угловой анизотропии потоков электронов с энергией $\sim 0.1 - 14$ кэВ как инструмента изучения динамики потоков горячей плазмы в районе геостационарной орбиты.

Методика измерений

Анализируемые в работе экспериментальные данные были получены на геостационарном спутнике ГОРИЗОНТ-35, который находился на 80° в. д., что соответствовало широте $\sim 9^\circ$ и местному времени $LT \approx UT + 5^h$. Спутник имел фиксированную ориентацию по трем осям с осью X , направленной к центру Земли, и осью Z – на северный полюс эклиптики. Измерения спектров потоков электронов в диапазоне энергий $E_e \sim 0.1 \div 14$ кэВ проводились аппаратурой АДПЭ [5], в состав которой входили два идентичных электростатических анализатора с канальными электронными умножителями в качестве детекторов частиц [6]. Анализаторы были ориентированы в двух взаимно перпендикулярных направлениях: один анализатор был направлен по радиус-вектору от Земли (J_x) и регистрировал потоки в 16 энергетических интервалах, а второй был направлен на юг (J_z) и регистрировал потоки в 32 энергетических интервалах. Время измерения в одном энергетическом интервале составляло 4 с, а время измерения полного энергетического спектра – 128 с. Энергетическая ширина каналов обоих анализаторов была одинакова, но в первом анализаторе запись информации производилась через один канал по сравнению со вторым анализатором.

Обсуждение экспериментальных результатов

Для анализа некоторых особенностей углового распределения потоков электронов на геостационарной орбите был выбран период с 11 по 25 марта 1992 г. Особенностью этого небольшого интервала времени было наличие нескольких дней с $B_z > 0$ (северная ориентация межпланетного магнитного поля) — геомагнитно спокойных, а также слабых и умеренных геомагнитных возмущений. Подробный анализ геомагнитной обстановки и динамики частиц в этот период приведен в работе [7].

Временной ход потоков электронов, зарегистрированных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, представлен на рисунке (две верхние панели). Представлены данные, полученные в трех каналах (средние энергии ~ 0.15 , ~ 1.2 и ~ 13.6 кэВ) каждого из детекторов. В качестве характеристики геомагнитной активности выбрана *Dst*-вариация (нижняя панель рисунка). Для анализа угловых особенностей распределений потоков электронов было посчитано отношение потока электронов, зарегистрированного в направлении на юг (J_z), к потоку электронов, зарегистрированному в направлении по радиус-вектору от Земли (J_x), в соответствующих энергетических каналах. Величины отношений J_z/J_x для одного энергетического канала ~ 1.2 кэВ представлены на рисунке (третья панель). При движении ИСЗ вдоль орбиты вокруг Земли происходит изменение питч-углов частиц, регистрируемых детекторами. По модели магнитного поля Цыганенко-89 [8] были рассчитаны питч-углы частиц, регистрируемых детектором, направленным по радиус-вектору от Земли (J_x) (рисунок, четвертая панель, штрихами обозначен местный полдень — 12LT).

Наблюдается ярко выраженная суточная вариация величины отношения J_z/J_x . Величина отношения J_z/J_x варьируется в основном в пределах от ~ 0.1 до ~ 1 с максимумом в ночные часы и минимумом в дневные. В местный полдень двумя детекторами регистрируются частицы с питч-углами $\sim 75^\circ$ (J_x) и $\sim 25^\circ$ (J_z), слабо зависящими от геомагнитной активности. В ночные часы в зависимости от геомагнитной активности питч-углы регистрируемых частиц варьируют от ~ 55 до $\sim 35^\circ$ детектором — J_x и от ~ 35 до $\sim 55^\circ$ — J_z соответственно. Точно оценить величины питч-углов регистрируемых в ночном секторе частиц, не представляется возможным. Расчет был сделан по модели Цыганенко-89 [8], в которой в качестве показателя геомагнитной активности вводится трехчасовой Кр-индекс. Несмотря на изменение регистрируемых питч-углов, можно говорить об анизотропном угловом распределении потоков электронов на большей части геостационарной орбиты.

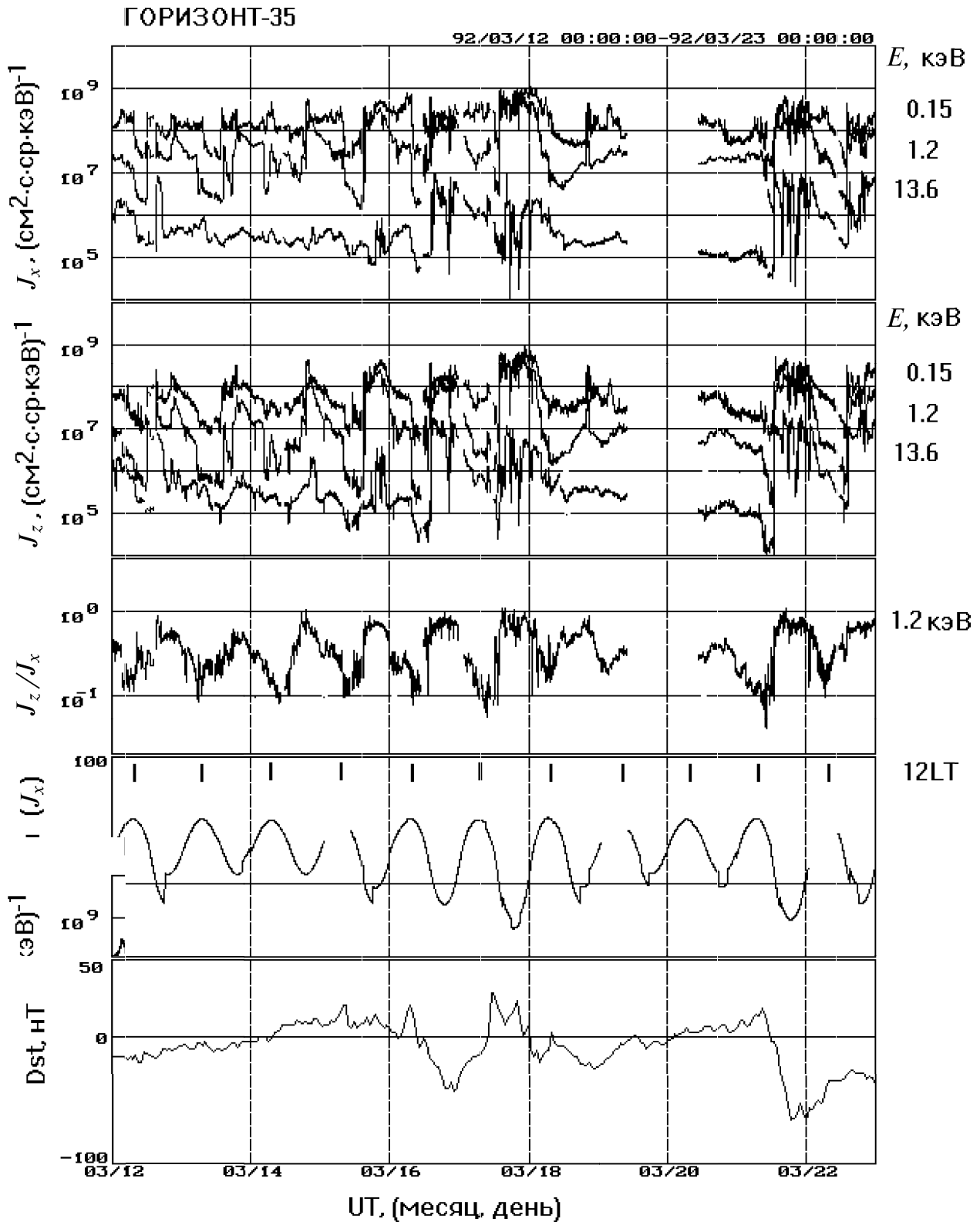
В рамках конвективной модели движения частиц горячей плазмы резкое возрастание частиц в вечер-

не-ночной части магнитосферы связано с пересечением сепаратрисы, разделяющей область замкнутых и разомкнутых дрейфовых оболочек [9]. Удаление от Земли сепаратрисы определяется величиной электрического поля «утро-вечер»: чем выше величина потенциала, тем ближе к Земле расположена сепаратриса. Величина электрического поля «утро-вечер» зависит от геомагнитной возмущенности: чем выше геомагнитная активность, тем больше величина электрического поля [10]. В очень спокойных геомагнитных условиях геостационарная орбита может располагаться внутри сепаратрисы, в области замкнутых дрейфовых оболочек (напр., 18–21 марта 1992 г., рисунок). В этом случае на суточной вариации интенсивности потоков электронов не наблюдается резкого возрастания в вечерне-ночном секторе. Суточный ход отношений потоков J_z/J_x также имеет плавный характер. Согласно результатам статистического анализа, представленного в [11], только в $\sim 5\%$ случаев геостационарная орбита находится внутри сепаратрисы.

12–15 марта 1992 г. (рисунок) геомагнитная активность была слабой, но характерное возрастание интенсивности потоков в ночном секторе наблюдалось практически во всем диапазоне измеряемых энергий электронов. В рамках конвективной модели положение сепаратрисы зависит от энергии частиц: чем больше энергия, тем дальше от Земли сепаратриса. Несмотря на резкое возрастание интенсивности потоков электронов в вечерне-ночном секторе, плавный характер суточной вариации отношений потоков J_z/J_x мало отличался от спокойной вариации на замкнутых дрейфовых оболочках, наблюдаемой 18–22 марта 1992 г. Величина J_z/J_x не достигала 1, что свидетельствует об анизотропии потоков электронов в ночном секторе на геостационарной орбите в условиях слабой геомагнитной активности.

16–18 марта 1992 г. наблюдалось небольшое геомагнитное возмущение (рисунок), 21–22 марта 1992 г. — слабая геомагнитная буря. Профиль изменения величины отношений потоков J_z/J_x практически повторяет профиль изменения интенсивности потоков электронов: резкое возрастание, величина отношений потоков J_z/J_x стремится к 1, платообразный (длительность плато ~ 8 часов) максимум, несмотря на изменения регистрируемых питч-углов. Следовательно, можно предположить, что в условиях геомагнитного возмущения угловое распределение потоков электронов в ночном секторе магнитосферы в области геостационарной орбиты близко к изотропному.

На основании результатов наблюдений электрических полей на авроральных силовых линиях и в хвосте магнитосферы (см., напр., [12]), которые показали, что амплитуды регистрируемых электрических полей в авроральной плазме значительно превышают регулярное поле «утро-вечер», было сделано предположение [13] о неадиабатической диффузии



Временной ход интенсивности потоков электронов с энергией ~ 0.15 , ~ 1.2 и ~ 13.6 кэВ, зарегистрированных детекторами в направлении от Земли (J_x) (верхняя панель) и в направлении на юг (J_z) (вторая сверху панель), величины отношения потоков J_z/J_x электронов с энергией ~ 1.2 кэВ, величины питч-угла частиц, регистрируемых детектором, направленным от Земли (J_x), величины Dst -вариации в период с 12 по 23 марта 1992 г.

и выравнивании гидродинамических параметров в плазменном слое. Предполагалось [14], что флуктуации поля при неэквипотенциальности магнитных силовых линий должны приводить к разрыву магнитных силовых трубок и интенсивному перемешиванию плазмы. Результаты наблюдений распределения скорости плазмы в хвосте магнитосферы на спутниках ISEE-2 и AMPTE/IRM (см., напр., [15, 16]) показали, что регулярная скорость движения плазмы плазменного слоя на порядок меньше стохастической. В работе [14] делается вывод, что крайне популярная картина регулярной конвекции в плазменном слое, в которой имеет место регулярное течение, должна быть заменена на картину, в которой доминирует нерегулярное стохастическое движение. Согласно полученным в данной работе экспериментальным результатам, стохастическое движение может иметь место в спокойных условиях и в условиях слабой геомагнитной активности в более удаленных от Земли частях плазменного слоя, чем область геостационарной орбиты. В условиях геомагнитных возмущений область стохастического движения может достигать геостационарной орбиты.

Заключение

Некоторые особенности угловой анизотропии (рассчитанной по двум точкам) потоков электронов в диапазоне энергий $\sim 0.1-14$ кэВ с 11 по 23 марта 1992 г. в области геостационарной орбиты:

— наблюдается ярко выраженная суточная вариация отношения потоков электронов, измеренных в двух взаимно перпендикулярных направлениях, — анизотропия потоков;

— в условиях низкой геомагнитной активности потоки электронов в ночном секторе анизотропны;

— во время геомагнитных возмущений потоки электронов в ночном секторе близки к изотропным.

Авторы выражают благодарность Н. Н. Павлову за помощь в обработке экспериментальных данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № НШ-2046.2003.2) и программы «Университеты России» (грант УР.02.03.011).

Литература

1. *McIlwain C.E.* // Plasma convection in the vicinity of geosynchronous orbit, in *Earth's Magnetospheric Processes* / Ed. by B.M. McCormac. Norwell, Mass., 1972. P. 268.
2. *Volland H.* // *J. Geophys. Res.* 1973. **78**, N 1. P. 171.
3. *Elphic R.C., Thomsen M.F., Borovsky J.E., McComas D.J.* // *J. Geophys. Res.* 1999. **104**. P. 22679.
4. *Thomsen M.F., Borovsky J.E., Skoug R.M., Smith C.W.* // *J. Geophys. Res.* 2003. **108**, N A4, P. 1151, doi:10.1029/2002JA0009544.
5. *Vlasova N.A., Goryainov M.F., Kutuzov Yu. V.* et al. // Proc. Intern. Conf. «Problems of spacecraft/environment interactions». Novosibirsk, 1992. P. 45.
6. *Бабаев А.П., Липовецкий В.А., Марьин Б.В.* и др. // Тр. ГосНИЦИПР. 1980. СПб., Гидрометеоздат. Вып. 11. С. 11.
7. *Власова Н.А., Ковтюх А.С., Кутузов Ю.В.* и др. // Космические иссл. 2001. **39**, № 3. С. 1.
8. *Tsyganenko N.A., Usmanov A.V., Malkov M.V.* // *J. Geophys. Res.* 1994. **99**. P. 11319.
9. *Korth H., Thomsen M.F.* // *J. Geophys. Res.* 2001. **106**, N A12. P. 29655.
10. *Rowland D.E., Wygant J.R.* // *J. Geophys. Res.* 1998. **103**, N A7. P. 14959.
11. *Sosnovets E.N., Kootyukh A.S., Laschuk E.A.* et al. // Proc. 4 Intern. Conf. «Problems of Geocosmos». St. Petersburg, 2002. P. 213.
12. *Mozar F.S., Cattell C.A., Hudson M.K.* et al. // *Space Science Reviews.* 1980. **27**, N 1. P. 153.
13. *Антонова Е.Е.* // Геомагнетизм и астрономия. 1985. **25**, № 4. С. 623.
14. *Antonova E.E., Stepanova M.V., Vikhreva E.A.* et al. // *J. Geophys. Res.* 1999. **104**. P. 19941.
15. *Angelopoulos V., Kennel C.F., Coroniti F.V.* et al. // *J. Geophys. Res. Letters.* 1993. **20**, N 16. P. 1711.
16. *Borovsky, J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C.* // *J. Geophys. Res.* 1998. **103**. P. 17617.

Поступила в редакцию
03.07.03