

## ОБНАРУЖЕНИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ И УСКОРЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА РАССТОЯНИЯХ 0,5 МЛН. КМ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

*Р.А. Ковражкин, Ж.М. Боске, Л.М. Зеленый, Н.В. Джорджио*

Исследованы распределения пучков энергичных частиц в высокоширотной ионосфере по измерениям на спутнике "Ореол-3". Генерация пучка связана с пересоединением в дальних областях магнитосферного хвоста. Последующий дрейф ускоренной плазмы в поперечном электрическом поле приводит к образованию структур высыпающихся частиц с дисперсией по энергии.

Пересоединение магнитных полей, приводящее к трансформации магнитной энергии в тепловую и кинетическую энергию плазмы, ответственно за многие важные явления, происходящие на Солнце (вспышки), в лабораторной плазме (неустойчивости срыва в токамаках) и в магнитосфере Земли. Для физики магнитосферы одним из важных вопросов является механизм нагрева и ускорения плазмы солнечного ветра на фазе восстановления суббури, когда частицы, конвектирующие из плазменной мантии начинают восполнять потери опустошенного плазменного слоя. Не исключено, что это явление носит перманентный характер, с большей или меньшей интенсивностью "подпитывая" плазменный слой и в остальные периоды. По современным представлениям источник генерации и ускорения частиц находится на расстояниях порядка 0,5 млн. км ( $70 - 100 R_E$ ,  $R_E$  — радиус Земли), в зависимости от условий в магнитосфере и соответствует области квазистационарного пересоединения геомагнитного и межпланетного магнитных полей (см. <sup>1-3</sup> и библиографию к ним). Эта область расположена значительно дальше в геомагнитном хвосте, чем "ближняя" зона пересоединения, появляющаяся на главной фазе магнитосферной суббури <sup>4</sup>.

Согласно простым расчетам траекторий протонов <sup>5</sup> функция распределений частиц по питч-углам в дальнем хвосте состоит из двух компонент, большая из них содержит частицы с питч-углами  $> 0,2^\circ$ , которые отражаются от магнитных пробок на высотах более  $2 R_E$  и затем двигаются назад к источнику, другая — это частицы с питч-углами  $\leq 0,2^\circ$ , которые могут высыпаться в авроральную ионосферу. Дальняя зона пересоединения проектируется в ионосферу Земли на самую высокоширотную кромку авроральной зоны, характеристики

высыпаящихся частиц в которой аккумулируют информацию о физических процессах в плазменном резервуаре хвоста. Изучение структуры этой области авроральной зоны на сравнительно небольших высотах составляет цель данной работы.

Измерения были выполнены на спутнике "Ореол-3" (советско-французский проект "АР-КАД-3"). Спутник был запущен 21.09.81 г. со следующими параметрами: высота апогея —  $H_a = 2000$  км; высота перигея —  $H_p = 410$  км; наклонение орбиты к плоскости экватора —  $i = 82,5^\circ$ . На спутнике была установлена научная аппаратура для измерения тепловой и сверхтепловой плазмы, энергичных частиц, ОНЧ-волн, магнитных и электрических полей, излучений в полярных сияниях. Подробное описание аппаратуры дано в <sup>6</sup>; в этой работе использованы данные прибора ROBE (измерения протонов и электронов  $0,2 \div 21$  кэВ), ION-1 и ION-2 (измерения массового состава ионов с ат. ед. массы =  $1 \div 32$  и  $E/Q = 0,01 \div 5$  кэВ/заряд).

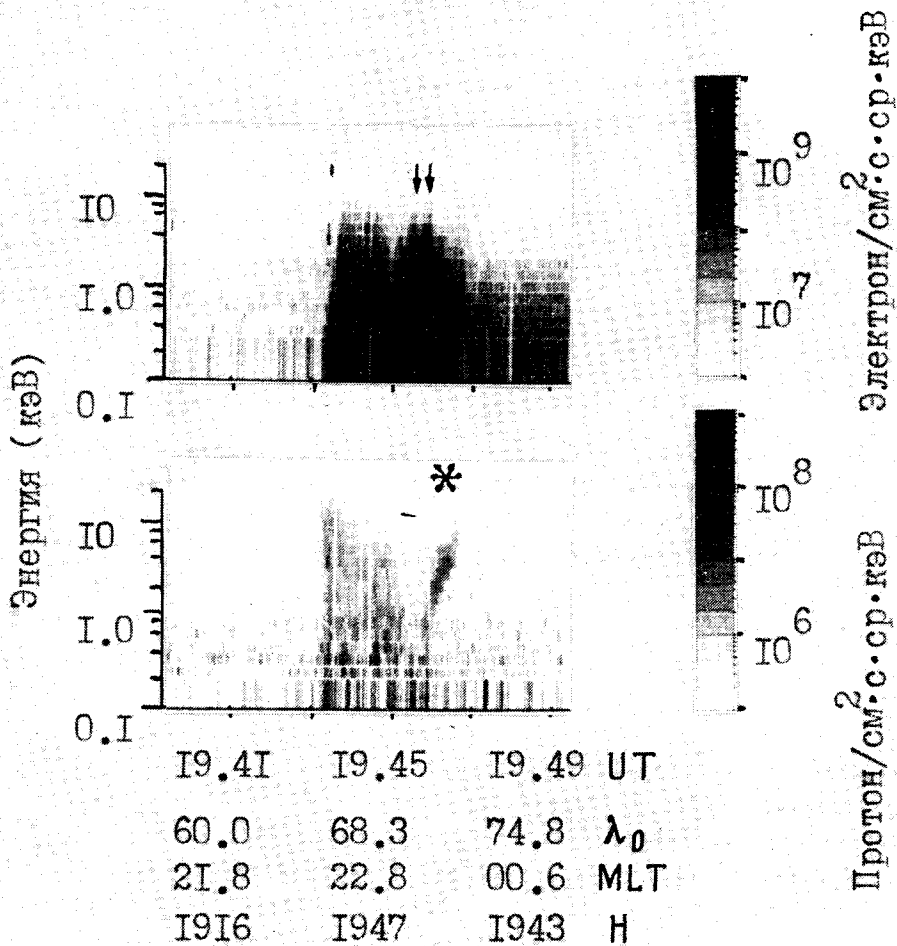


Рис. 1. Спектрограмма энергия-время электронов (верхняя спектрограмма) и ионов (нижняя спектрограмма) для 5002 витка спутника "Ореол-3". Стрелками помечены структуры типа "перевернутого V" над спектрограммой электронов. Звездочкой над спектрограммой ионов помечена авроральная структура скоростной дисперсии (АССД)

В ходе этой работы было рассмотрено около 500 пересечений спутником "Ореол-3" авроральной зоны в ночной области магнитосферы для разных геомагнитных условий. На 20 пролетах спутника обнаружена характерная дисперсионная полоса высыпаний частиц: эне-

ргия ионов — инвариантная широта (рис. 1, нижняя спектрограмма). На полярном краю зоны высыпания ( $\lambda = 71,5^\circ$ ) максимум дифференциального потока ионов находится на энергии  $E_p = 10,5$  кэВ, с уменьшением инвариантной широты энергия для максимума потока ионов падает и достигает  $E_p = 0,7$  кэВ на широте  $\lambda = 69,7^\circ$ . Далее к экватору средняя энергия ионов в высыпаниях возрастает, что является классической картиной ускорения ионов в плазменном слое с приближением к Земле за счет бетатронного и Ферми-механизмов (см., например, <sup>7</sup>). Такая структура наблюдается полярнее вторжений электронов в так называемых "перевернутых V" (рис. 1, верхняя спектрограмма).

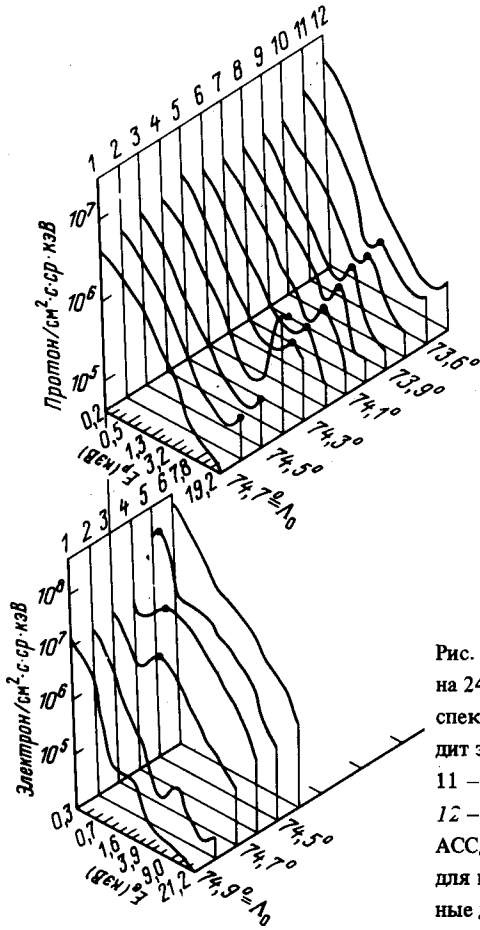


Рис. 2. Спектры протонов — а и электронов — б на 2427 витке спутника "Ореол-3". На рис.а на спектрах 1–3 энергия "пика" протонов выходит за диапазон измерения прибора; спектры 4–11 — ярко выраженная структура АССД; спектр 12 — фоновый спектр за экваториальным краем АССД. На рис. б : 1, 2 — спектры, характерные для полярной шапки; 3–5 — спектры, характерные для структуры АССД.

Можно отметить следующие характерные черты обнаруженной авроральной структуры скоростной дисперсии (АССД):

1. На основании измерений массового состава ионов (приборы ION-1 и ION-2) можно заключить, что ионы, обнаруженные в структурах, являются протонами.
2. На полярном краю АССД максимум потока протонов расположен на больших энергиях, чем на экваториальном краю, независимо от того, проходил ли спутник эту зону с экватора к полюсу (9 случаев) или от полюса к экватору (11 случаев). Это служит доказательством, что явление АССД — пространственное, а не временное. Действительно, если бы АССД была связана с временным эффектом, то при движении частиц от области генерации до высот спутника сначала регистрировались бы более энергичные протоны, а затем — низкоэнергичные. Однако, при движении спутника от экватора к полюсу (см. рис. 1, виток 5002) сначала регистрируются низкоэнергичные протоны, а не высокоэнергичные.

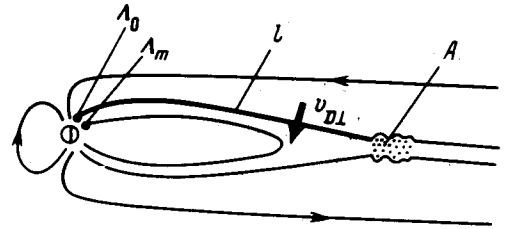


Рис. 3. Схема образования широтной энергетической дисперсии пучка при движении его из хвоста магнитосферы вследствие эффекта электрического дрейфа (А — область пересоединения; остальные обозначения даны в тексте)

3. Максимальное число явлений АССД наблюдается в предполуночном секторе магнитосферы (8 случаев в  $MLT = 22 - 24^H$ ).

4. Явления АССД наблюдаются на фазе восстановления суббурь, причем большинство из них регистрируются при слабых магнитосферных суббурях (максимальный  $AE$ -индекс около 300 нТ).

5. Энергия, на которой наблюдается максимум потока протонов на полярной границе АССД, иногда оказывается выше, чем позволяет измерить прибор ROBE; на рис. 2, а (виток 2427) на спектрах 1, 2, 3 поток не доходит до действительного максимума на энергии 20 кэВ. Рассмотрение спектров электронов для этого витка (рис. 2, б) показывает, что дисперсионная структура действительно наблюдается также и на более высоких широтах.

Энергоширотная дисперсия в АССД может быть объяснена эффектом фильтрации частиц при поперечном смещении их под действием электрического дрейфа при движении из хвоста магнитосферы до точки наблюдения в ионосфере (рис. 3). Действительно, для смещения по инвариантной широте можно записать:

$$\frac{2\pi(R_3 + H)}{360^\circ} (\lambda_0 - \lambda_m) = \int v_{D\perp} d\tau \cong \int v_{D\perp} \frac{dl}{\sqrt{2E_{\parallel}/m}} \cong \bar{v}_{D\perp} l / \sqrt{2E_{\parallel}/m} \sim E_{\parallel}^{-1/2},$$

где  $H$  — высота спутника;  $\lambda_0$  — инвариантная широта источника генерации частиц;  $\lambda_m$  — инвариантная широта наблюдаемого пика частиц;  $v_{D\perp}$  — скорость дрейфа;  $E_{\parallel}$  — продольная энергия частиц;  $l$  — расстояние от источника (области ускорения) до ионосферы.

Данные всех измерений хорошо ложатся на прямую  $1/\sqrt{E} = f(\lambda_m)$ , таким образом, по граничной широте (см. пункт 5) была оценена максимальная энергия "пика" протонов. Она оказывается  $\lesssim 100$  кэВ (в частности, для витка 2427 максимальная энергия "пика" протонов должна бы быть  $E_p = 70$  кэВ на  $\lambda = 74,7^\circ$ ).

Таким образом, явление АССД — это ионосферный автограф пучков частиц, идущих из пограничного плазменного слоя, где, как полагают, происходит процесс пересоединения межпланетного и геомагнитного полей. Необходимо отметить, что дисперсионная картина, сходная с явлением АССД, наблюдалась в геомагнитном хвосте для протонов более 25 кэВ<sup>8</sup> на расстояниях  $(14 - 15)R_3$ . Однако на авроральных высотах такое явление удалось наблюдать впервые, благодаря высокому пространственному разрешению плазменных экспериментов на спутнике "Ореол-3".

Авторы выражают глубокую благодарность А.А.Галееву за многочисленные полезные обсуждения этой работы.

#### Литература

1. Frank L.A. Space Sci. Rev., 1985, 42, 211.
2. Scholer M., Sckopke N. et al. J. Geophys. Res., 1985, 90, 2735.
3. Scholer M., Gloeckler G. et al. Geophys. Res. Lett., 1984, 11, 1034.
4. Галеев А.А., Зеленый Л.М. Письма в ЖЭТФ, 1975, 22, 360.
5. Green J.L., Horwitz J.L. Geophys. Res. Lett., 1986, 13, 76.
6. Ann. Geophys., 1982, 38, no. 5.
7. Galperin Yu.I. et al. J. Geophys. Res., 1978, 83, 2567.
8. Andrews M.K., Daly P.W., Keppler E. Geophys. Res. Lett., 1981, 8, 987.