

УДК 551.510.536

© 1990 г.

*К. И. Грингауз, В. С. Бассоло*

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ.  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПРОБЛЕМЫ  
ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
(Обзор)**

Обсуждаются результаты прямых измерений концентрации и температуры плазмы, а также массового и зарядового состава ионов плазмосферы; в основном использованы данные, полученные за последнее десятилетие. Показано, что эти данные подтверждают существование двух зон в плазмосфере; внутренней ( $L < 3$ ) — стабильной, квазистационарной и холодной ( $T_i \approx 0,8$  эВ) и внешней — обычно теплой ( $T_i > 1$  эВ), существенно нестационарной, с большими продольными градиентами параметров.

Граница внешней зоны — плазмопауза — четко выражена в вечерне-ночные часы и обычно размыта в дневном секторе, имеет сложную нестационарную структуру, сильно меняется в зависимости от геомагнитных условий и обладает асимметрией по местному времени, причем надежно выделяются вечерний и полуденный выступы плазмопаузы в экваториальной плоскости.

Сопоставление этих данных с теоретическими представлениями приводит к выводу, что в настоящее время не существует общепринятой модели, адекватно описывающей все основные особенности наблюдаемой структуры и динамики плазмопаузы.

### 1. Введение

Со времени последней публикации на русском языке обзора результатов исследования плазмосферы Земли [1] прошло более 10 лет. За это время накопился обширный экспериментальный материал, полученный со спутников «Прогноз-5-8»; ISEE-1, -2; GEOS-1, -2; DE-1, -2. Эти данные отчасти подтвердили прежние сведения о структуре и динамике плазмосферы, отчасти позволили уточнить и расширить представления о ее свойствах, а также стимулировали дальнейшее развитие теоретических моделей плазмосферы. На русском языке вышли две монографии, посвященные физическим процессам в плазмосфере [2, 3], однако обе работы охватывают главным образом теоретические задачи моделирования физических процессов в холодной околоземной плазме, причем авторы монографии [2] И. А. Кринберг и А. С. Тацилин, базируясь на экспериментальных данных, опубликованных в 70-е годы и теоретических концепциях того времени, практически игнорируют некоторые существенные экспериментальные данные о форме плазмопаузы, приведенные еще в об-

зоре [1] и подтвержденные экспериментами в 70–80-х годах, а в области теории плазмопаузы по существу продолжают базироваться на концепции, предложенной Нишидой и Брайсом еще в 1966 г. Эти вопросы более подробно обсуждаются ниже.

Цель настоящей публикации — дать современный обзор основных экспериментальных результатов исследования плазмосферы Земли за последнее десятилетие в сопоставлении с прежними данными. Рассматриваются следующие аспекты: тепловая структура плазмосферы и распределение концентрации ионов и электронов, химический и зарядовый состав плазмосферы и, наконец, динамика внешней зоны плазмосферы и плазмопаузы, а также их связь с основными структурами в магнитосфере в свете современных теоретических представлений.

## 2. Распределение температуры и концентрации плазмы в плазмосфере

**2.1. Измерения со спутников серии «Прогноз».** Спутники серии «Прогноз» (по спутник «Прогноз-8» включительно) запускались на практически одинаковые орбиты с апогеем 200 000 км, с наклоном к экватору  $65^\circ$  и периодом обращения вокруг Земли  $\sim 4$  сут: ось вращения спутника направлена на Солнце. Спутник в течение сравнительно короткого интервала времени ( $\sim 3$  ч) пересекает один и те же  $L$ -оболочки на различных высотах и широтах и позволяет судить о параметрах плазмосферной плазмы в различных сечениях одной и той же  $L$ -оболочки.

Результаты обработки измерений концентрации и температуры ионов плазмосферы со спутников «Прогноз-5,-6» подробно описаны в статьях [4, 5]. В этих работах приведены наиболее типичные кривые профилей  $n_i(L)$ ,  $T_i(L)$  с учетом геомагнитной предыстории наблюдаемой картины распределения ионов (сумма  $K_p$ -индексов магнитной активности за предшествующие сутки, а также величины  $D_{st}$ -вариаций геомагнитного поля в период наблюдений). Сформулируем основные выводы анализа результатов обработки этих измерений (рис. 1):

- 1) плазмосфера часто весьма неоднородна по концентрации плазмы и ионной температуре, особенно в районе плазмопаузы;
- 2) полуночно-полуденная асимметрия плазмопаузы имеет место в большинстве случаев при малой и умеренной магнитной возмущенности, что подтверждается данными других измерений, однако такая асимметрия наблюдается не всегда;
- 3) дневной профиль  $n_i(L)$  в большинстве случаев является более пологим, чем ночной;
- 4) четко выраженная плазмопауза в виде области быстрого спада концентрации плазмы может наблюдаться либо на дневной и на ночной стороне плазмосферы, либо только на дневной или только на ночной стороне, либо вообще отсутствует, т. е. спад концентрации плазмы с увеличением  $L$  иногда может быть постепенным;
- 5) внутренняя зона плазмосферы ( $L < 3$ ), как правило, холодная ( $T_i \approx 8 \cdot 10^3$  К);
- 6) во внешней части плазмосферы может наблюдаться теплая плазма: (а) на дневной и на ночной стороне ( $T > 8 \cdot 10^3$  К); (б) только на ночной стороне; (в) только на дневной стороне;
- 7) в очень редких случаях условие  $T \approx 8 \cdot 10^3 - 10^4$  К выполняется во всей плазмосфере (теплая зона отсутствует).

Таким образом, измерения со спутников «Прогноз» позволяют заключить, что плазмосфера является динамичным образованием — структура плазмосферы сильно меняется со временем и уровнем геомагнитной активности. Кроме того, структурные особенности (наличие или отсутствие четко выраженной плазмопаузы, наличие и протяженность теплой зоны, экваториальное расстояние до плазмопаузы  $L_{pp}$ , плавность хода профилей  $n_i(L)$  и  $T_i(L)$ ) обнаруживают сильную зависимость от местного времени. Измерения со спутников серии «Прогноз» позволили обнаружить две важные структурные особенности плазмосферы: полуденно-полуночную

$n_i$   
10<sup>4</sup>  
10<sup>2</sup>  
10<sup>0</sup>

Рис. 1.  
(темны  
сфере  
(16.03.7

асимметрию  
зультаты по  
ряд исследо  
фактах подр

### 2.2. Пол

плазмосфер  
подтвержде  
по данным  
ного волнов  
взаимного  
ной плазмос  
вого экспери  
ченным в 19  
ний, величин  
и значитель  
что вполне  
«Прогноз».  
находятся  
в 1972 г.; в  
паузы в на  
нечного диа  
наличие это  
к обсужден  
зики плазм

### 2.3. Теп

о температу  
ченые Гр  
ской раке  
ника OGO-  
малых на  
Грингауза  
показано, ч  
тора, но во  
как состоя  
( $L > 3$ ,  $T_i \geq 10^4$ )  
зону называ

После 1

в области  
инценции,  
более под-

зных экс-  
а послед-  
риваются  
еделение  
тав плаз-  
мопаузы,  
ете совре-

ки серии  
на прак-  
и к эвато-  
спутни-  
ского ш-  
а различ-  
осферной

ры ионов  
в статьях  
профилей  
картины  
за пред-  
ного поля  
а резуль-

и плазмы

место в  
ценности,  
симметрия

более по-

спада кон-  
рчной сто-  
й стороне,  
ичением  $L$

холодная

ая плазма:  
на ночной

няется во

ют заклю-  
структура  
итной ак-  
отсутствие  
лой зоны,  
профилей  
о времени.  
ужить две  
луночную

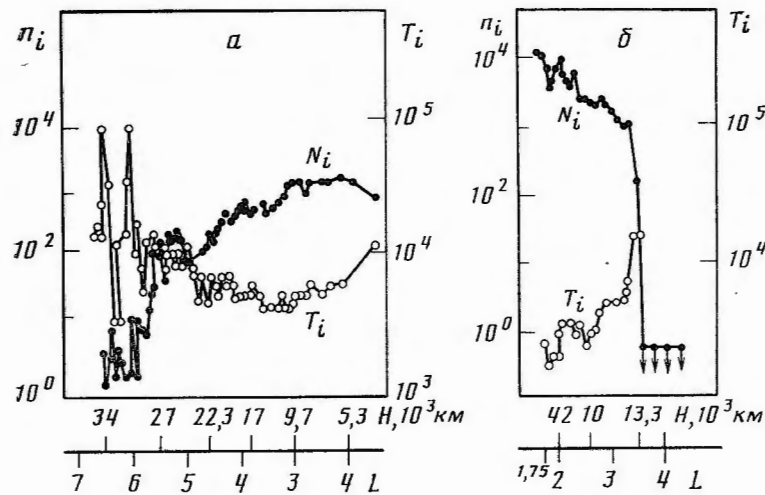


Рис. 1. Пример типичного распределения по  $L$ -оболочкам концентрации (темные кружки) и температуры (светлые кружки) ионов в плазмосфере по измерениям со спутника «Прогноз-5»:  $a$  — дневные профили (16.03.77 г., 10.15–11.50 MLT,  $K_{pm}=3$ ,  $\Sigma K_p=14$ ,  $D_{st}=-20$ );  $b$  — ночные профили (08.02.77,  $K_{pm}=4$ ,  $\Sigma K_p=25$ ,  $D_{st}=-27$ ) [4]

асимметрию плазмосферы и наличие теплой зоны плазмосферы. Эти результаты подтвердились в дальнейшем по другим данным, по поскольку ряд исследователей продолжает их игнорировать, остановимся на этих фактах подробнее.

**2.2. Полуденно-полуночная асимметрия плазмосферы.** Это свойство плазмосферы после его обнаружения Грингаузом и Безруких [6] было подтверждено по данным двойного зонда на спутнике «Explorer-45» [7], по данным наблюдений свистящих атмосфериков [8] и по данным активного волнового эксперимента на спутнике GEOS-1 («измерения методом взаимного импеданса») [9]. Это различие свойств полуденной и полуночной плазмосферы было подтверждено по данным другого активного волнового эксперимента — релаксационного зонда со спутника GEOS-2, полученным в 1979 г. [10]. Как показывает анализ результатов этих измерений, величины  $n_e$  в полдень существенно выше и стабильнее, чем меньшие и значительно более сильно разбросанные значения  $n_e$  вблизи полуночи, что вполне соответствует результатам, полученным со спутников серии «Прогноз». Данные спутника «Прогноз-5» (1977 г.) и GEOS-2 (1979 г.) находятся в согласии с данными со спутника «Прогноз», полученными в 1972 г.; все вместе они свидетельствуют о том, что асимметрия плазмосферы в направлении полдень — полночь наблюдается во всех фазах солнечного цикла. Измерения на спутниках DE и ISEE также подтвердили наличие этой важной особенности плазмосферы, так что мы еще вернемся к обсуждению этого вопроса, учитывая его очевидную важность для физики плазмосферы и проблемы циркуляции магнитосферной плазмы.

**2.3. Теплая зона в плазмосфере.** До 1976 г. единственными данными о температуре заряженных частиц в плазмосфере были оценки  $T_i$ , полученные Грингаузом с сотрудниками на основе измерений [11] на советской ракете «Луна-2», и данные Сербу и Майера о  $T_i$  и  $T_e$  [12] со спутника OGO-5; причем измерения Сербу и Майера были проведены при малых наклонениях к экваториальной плоскости. В работе Безруких и Грингауза [13] приведены данные о  $T_i$  в различных сечениях  $L$ -оболочек; показано, что при  $L < 3$ ,  $T_i \leq 8 \cdot 10^3$  K не только вблизи геомагнитного экватора, но во всей плазмосфере, и предложено рассматривать плазмосферу как состоящую из «холодной» зоны ( $T_i \leq 8 \cdot 10^3$  K) и «горячей» зоны ( $L > 3$ ,  $T_i \geq 10^4 - 2 \cdot 10^5$  K, как отмечалось выше); целесообразнее «горячую» зону называть «теплой» зоной плазмосферы.

После 1976 г. опубликовано много экспериментальных данных, сви-

детельствующих о том, что при  $L > 3$ ,  $T_i \sim 1-20$  эВ. Большинство этих публикаций относятся к зоне, близкой к экваториальной плоскости, — данные получены со спутников ATS-6, GEOS-1, -2, ISEE-1, SCATHA [9, 14-19]. Единственным спутником (кроме спутников серии «Прогноз»), проводившем измерения в плазмосфере достаточно далеко от экваториальной плоскости, является спутник DE-1. Все без исключения упомянутые измерения подтверждают существование «теплой» зоны в плазмосфере (хотя, как следует из приведенных выше данных «Прогноз-5», бывают случаи когда вся плазмосфера холодная —  $T_i \lesssim 1$  эВ).

Согласно данным со спутника DE-1, 14.X.1981 г. при  $L \sim 3,1$  обнаружены изотропные протоны с температурой  $T_{H^+} \sim 2-2,2$  эВ и с концентрацией  $n_{H^+} \approx 500-2000$  см<sup>-3</sup>, а также ионы He<sup>+</sup> с такой же температурой и концентрацией  $n_{He^+}$  (140-165) см<sup>-3</sup>. Кроме того, там же обнаружены анизотропные протоны H<sup>+</sup> с температурой  $T_{H^+} \approx 10$  эВ и концентрацией (2-5) см<sup>-3</sup> и ионы He<sup>+</sup> с  $T_{He^+} \approx 10$  эВ и  $n_{He^+} \approx 3-2$  см<sup>-3</sup>.

Через несколько минут после этого, когда спутник DE-1 оказался на плазмопаузе ( $L \sim 3,5$ ), концентрация изотропных ионов H<sup>+</sup> уменьшилась до 130-160 см<sup>-3</sup> при той же температуре  $\sim 2$  эВ. Концентрация и энергия анизотропных ионов H<sup>+</sup> увеличилась соответственно до 4 см<sup>-3</sup> и 15 эВ. Не имея возможности в настоящем обзоре подробно останавливаться на методических вопросах, отметим лишь, что в первом случае анализатор с тормозящим потенциалом на «Прогноз-5» не мог бы обнаружить присутствия анизотропной компоненты плазмы с повышенной температурой, а дал бы общую температуру  $T_i \sim 2,2$  эВ, а во втором (если анизотропные потоки попали бы в анализатор) — было бы отмечено повышение  $T_i$ .

Результаты плазмосферных измерений со спутника DE-1, таким образом, подтверждают концепцию холодной и «теплой» зон плазмосферы (при этом они содержат информацию о составе и детальной структуре «теплой» зоны). На некоторых энерго-спектрограммах со спутника DE-1 [20] «теплая» зона плазмосферы отчетливо различается от холодной зоны визуально.

**2.4. Измерения со спутников DE-1 и ISEE.** В предыдущем разделе мы упоминали некоторые результаты, полученные по данным спутника DE-1, в соответствии с результатами измерений концентраций и температуры в плазмосфере со спутников серии «Прогноз». К настоящему времени проведен значительный статистический анализ результатов измерений тепловой структуры плазмосферы и распределения ее ионной компоненты по  $L$ -оболочкам, полученных со спутников DE-1 и ISEE. На результатах этих работ целесообразно остановиться достаточно подробно.

Спутник DE-1 запущен в августе 1981 г. на околополярную орбиту с апогеем  $\sim 4,7R_E$ , перигеем ниже 1000 км и периодом обращения  $\sim 7,5$  ч. Орбита спутника позволяла исследовать плазму  $L$ -оболочки как на больших, так и на малых высотах, выявляя высотное распределение параметров исследуемых  $L$ -оболочек. На борту спутника был установлен ионный масс-спектрометр с входным анализом ионов методом тормозящего потенциала (RIMS); детальное описание этого прибора приведено в работе Чепела и др. [21]. Энергетический интервал измерений прибора охватывал 0-50 эВ, причем ионы H<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> регистрировались одновременно. Максимальная высота регистрации ионов определялась либо пределом чувствительности прибора, либо переходом от изотропного распределения по питч-углам к анизотропному продольному (вдоль магнитного поля) распределению ионов.

Спутник ISEE запущен в октябре 1977 г. на сильно вытянутую орбиту с апогеем  $\sim 22,5R_E$ , перигеем  $\sim 2R_E$ , наклоном  $\sim 30^\circ$  и периодом обращения 2,5 сут. Аппаратура комплекса «эксперимента по исследованию состава плазмы» (PCE) описана в работе [22], а методика обработки и анализа данных — в [23]. Энергетический диапазон измерений в режиме «тепловая плазма» — 0-1 эВ. Температура вычислялась по измеренному полному потоку частиц в предположении чисто протонного состава (ошибки обычно невелики, учитывая преобладание протонов в ионном составе плазмосферы).

Ав  
преде  
личие  
лу об  
1)  
типич  
2)  
3)  
ва ион  
распр  
соглас  
мп  
«Прог  
На  
различ  
центр  
мости  
Так,  
ност  
диент  
внутри  
темпе  
плотно  
выраж  
вые л  
кости  
спутн  
ход р  
лочки  
показа  
парам  
вдоль  
мосфе  
части  
дольн  
туры  
Рез  
крупн  
DE-1.  
с рост  
Др  
ется н  
обычно  
(рис. 2  
точно  
способ  
теплая  
плотно  
гут пр  
В н  
ляет р  
ионов,  
измере  
Ост  
ных па  
рые пл  
нем об  
на осн  
туры  
также  
ненны

Анализ полученных данных позволил выявить как общие черты распределения концентрации и температуры ионов, так и обнаружить различные профили, объясняющиеся изменением условий наблюдения. К числу общих характеристик относятся следующие:

- 1) температура понов плазмосферы при всех MLT выше значений, типичных для ионосферы;
- 2) температура  $T_i$  растет с ростом  $L$ ;
- 3) на больших высотах в плазмосфере существуют источники нагрева ионов, повышающие энергию частиц при росте  $L$ . Эти общие свойства распределения понов плазмосферы по данным спутников DE-1 и ISEE согласуются между собой и с результатами измерений на спутниках серии «Прогноз».

Наряду с этим наблюдались сильные различия в характере  $L$ -профилей концентрации и температуры понов в зависимости от уровня геомагнитной активности. Так, при высокой магнитной возмущенности наблюдаются обычно большие градиенты плотности плазмы на плазмопаузе, внутри которых резко возрастает градиент температуры. В спокойное время градиент плотности на плазмопаузе не столь резко выражен. Поскольку геомагнитные силовые линии лежат приблизительно в плоскости орбиты DE-1, измерения с этого спутника позволили оценить высотный ход распределения плазмы вдоль  $L$ -оболочек; результаты анализа измерений показали, что в возмущенных условиях параметры плазмы были почти постоянны вдоль силовых линий во внутренней плазмосфере, в то время как во внешней ее части наблюдались значительные продольные градиенты плотности и температуры ионов.

Результаты измерений со спутника ISEE указывают на существование крупномасштабных структур, обычно не наблюдавшихся со спутника DE-1. Например, наблюдались случаи понижения температуры ионов с ростом  $L$  при  $L > 4$ .

Другой важной особенностью тепловой структуры плазмосферы является наличие слабой примеси надтепловой плазмы во внешней зоне, обычно не наблюдаемой на фоне более плотной холодной компоненты (рис. 2). Однако в тех случаях, когда плотность холодной плазмы достаточно низка и достаточно высокий положительный потенциал спутника способен экранировать холодную компоненту ионов, наблюдалась лишь теплая компонента (согласно данным [20]). В присутствии достаточно плотной холодной компоненты малые изменения потенциала спутника могут приводить к кажущимся флуктуациям температуры.

В некоторых случаях, но не всегда, аппаратура спутника DE-1 позволяет разграничить истинные и кажущиеся флуктуации температуры ионов, однако это обстоятельство следует учитывать при интерпретации измерений температуры ионов во внешней плазмосфере.

Остановимся теперь на результатах статистического анализа структурных параметров плазмосферы по данным спутников DE-1 и ISEE, которые иллюстрируются рис. 3, 4. Тепловая структура плазмосферы в среднем обнаруживает основные особенности, которых можно было ожидать на основе анализа отдельных наблюдений, но средний градиент температуры во внутренней плазмосфере оказался выше ожидаемого. Следует также отметить, согласно [23], что чрезвычайно малое рассеяние усредненных данных (более 100 наблюдений, различные геомагнитные усло-

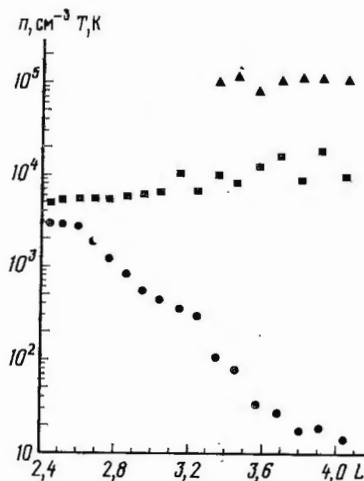


Рис. 2. Распределение по  $L$ -оболочкам температуры холодной (квадраты) и теплой (треугольники) компоненты ионов  $H^+$  и их концентрация (кружки) по данным спутника DE-1 (9.10.81 г., ~22 MLT) [23]

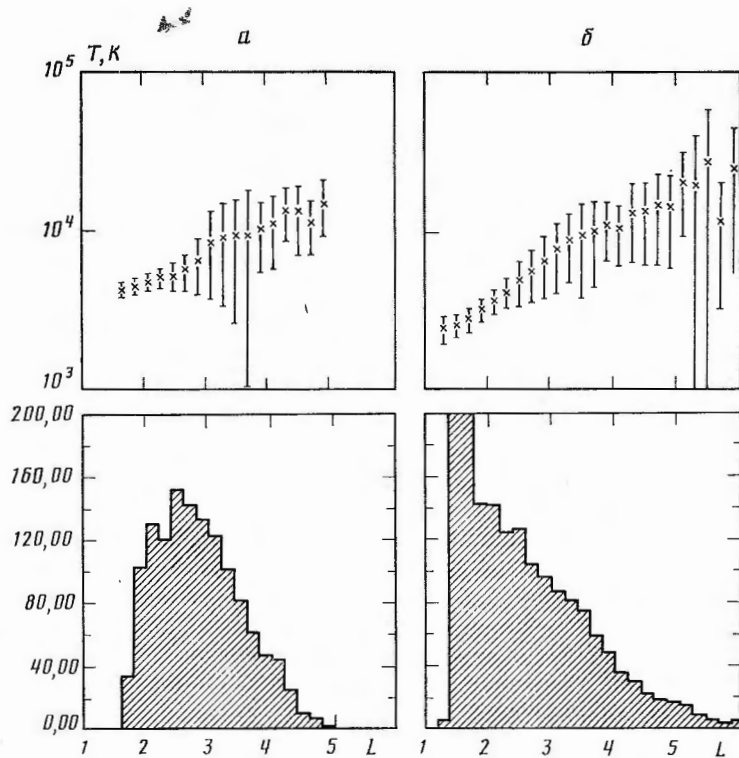


Рис. 3. Средние профили температуры ионов  $H^+$  (интервал усреднения  $\Delta L=0,2$ ) по измерениям со спутника DE-1 (X—XI, 1981 г.). В нижней части рисунка представлено число наблюдений, соответствующее каждому интервалу усреднения по  $L$ : а — местное утро ( $\sim 7-11$  MLT), б — местный вечер ( $\sim 19-22$  MLT) [20]

вия, интервал MLT  $\sim 4$  ч) на  $L=1,9$  указывает на высокую стабильность ионной температуры в этой области. Поскольку температура ионов в утреннем секторе приблизительно в 1,5 раза выше, чем в вечерние часы, очевидно, к утру успевает восстановиться дневное квазиравновесное значение после ночного охлаждения. Наложение температурных кривых разных измерений показывает, что при  $L > 2,5$  температура ионов в утренние часы удивительно стабильна вплоть до самых больших расстояний. Наряду с этим внутри  $L=2,5$  вечерние температуры значительно ниже утренних в соответствии с тем, что в вечерние часы на внутренних  $L$ -оболочках начинается сильное охлаждение ниже лежащей ионосферы. Кроме того, стандартные отклонения средних значений температуры значительно меньше на утренней стороне, чем на вечерней внутри  $L=3,0$ . Это свидетельствует о том, что вечерний сектор — более чувствительная переходная область от дневных к ночным условиям. Сразу за пределом  $L=3$  температура ионов  $H^+$  резко возрастает и остается в интервале  $10^4-2 \cdot 10^4$  К ( $\sim 1-2$  эВ), слегка увеличиваясь с ростом  $L$ . Еще одна интересная особенность утренних профилей  $n_i(L)$ ,  $T_i(L)$  — область больших значений стандартных отклонений усредненных величин, локализованная в интервале  $3,1 < L < 3,7$ . Это может быть связано с локализацией зоны крутых градиентов, соответствующих резкой смене условий в узком интервале значений  $L$ .

Средние значения температуры по измерениям со спутника ISEE-1 представлены на рис. 4. Следует отметить несколько интересных особенностей приведенных на рис. 4 профилей. На дневной стороне наблюдается спад температуры с ростом  $L$  во внутренней ( $L < 3$ ) зоне плазмосферы, что не является артефактом, возникшим в результате процесса усреднения, поскольку подобные случаи наблюдались индивидуально [23]. Одна-

10<sup>5</sup> T, K  
10<sup>4</sup>  
10<sup>3</sup>  
200,00  
160,00  
120,00  
80,00  
40,00  
0,00  
1 2 3 4 5 L  
1 2 3 4 5 L  
10<sup>5</sup>  
10<sup>4</sup>  
10<sup>3</sup>  
10<sup>2</sup>  
10<sup>1</sup>  
10<sup>0</sup>  
2  
Рис. 3.  
ника  
(e - )

ко стол  
лись по  
Дру  
ночные  
следует  
спутник  
п ночна  
ных по  
на ISEE  
ниям п  
L-обло  
активно  
сопосла  
При  $L <$   
данным  
более п  
так и с  
дений.  
п ISEE  
измере  
Необход  
окончат  
Ана  
магнитн  
( $L < 3$ )

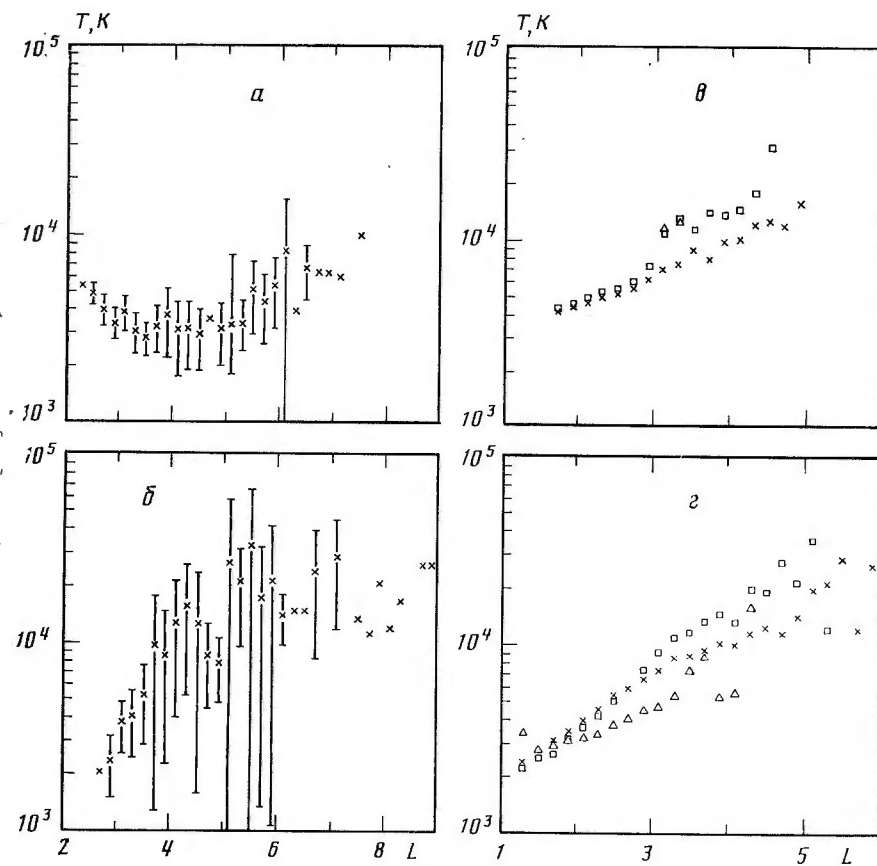


Рис. 4. Средние профили температуры ионов  $H^+$  по наблюдениям со спутника ISEE (*a* — день, 6–18 MLT; *б* — ночь, 18–06 MLT) и со спутника DE-1 (*в* — утро, *г* — вечер), которые разделены на три группы: крестики —  $K_p=0-3^-$ , квадраты —  $K_p=3^-6^-$ , треугольники —  $K_p=6^-$

ко столь большие отрицательные градиенты  $\partial T/\partial L$  никогда не наблюдались по данным спутника DE-1.

Другая anomальная особенность — во внешней плазмосфере ( $L > 3$ ) ночные температуры оказались значительно выше дневных. Вместе с тем следует напомнить, что согласно гораздо большему набору данных со спутника DE-1 для более узких интервалов местного времени дневная и ночная температуры были одинаковы. Сравнение профилей, построенных по данным спутника DE-1 (рис. 4, *в, г*), с результатами измерений на ISEE (рис. 4, *а, б*), показывает, что дневные температуры по измерениям на ISEE гораздо ниже значений, полученных на DE-1, для всех  $L$ -оболочек. Возможно, это объясняется более низким уровнем солнечной активности. В то же время ночные профили по данным ISEE и DE-1 сопоставимы в области  $L > 4$ , хотя разброс данных велик в обоих случаях. При  $L \leq 4$  значения  $T_i$  гораздо быстрее убывают с уменьшением  $L$  по данным ISEE, чем по измерениям DE. Это согласуется как с включением более поздних ночных часов в интервал наблюдений со спутника ISEE-1, так и с более низким уровнем солнечной активности в период этих наблюдений. Не исключено, что описанные различия наблюдаемой на DE-1 и ISEE-1 структуры объясняются ограниченностью временного сектора измерений со спутника DE-1, подвергнутого статистической обработке. Необходимо включить в анализ другие временные интервалы, чтобы окончательно выяснить причину описанных расхождений.

Анализ зависимости тепловой структуры плазмосферы от уровня магнитной активности показывает, в утренние часы во внутренней зоне ( $L < 3$ ) температура ионов практически не зависит от  $K_p$ -индекса, в то

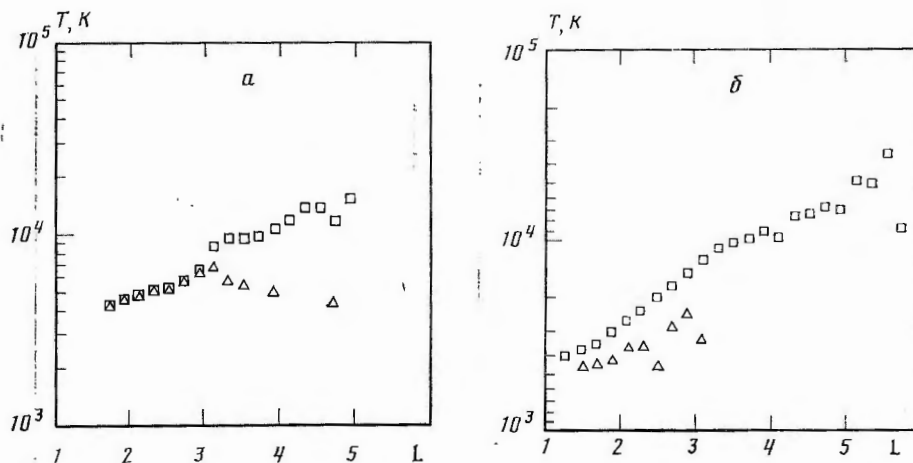


Рис. 5. Сопоставление профилей температуры по измерениям на больших (квадраты) и на малых (треугольники) высотах в пределах одной  $L$ -оболочки:  $a$  — утро (7–11 MLT),  $b$  — вечер (18–22 MLT)

время как во внешней плазмосфере повышение магнитной активности сопровождается ростом температуры (рис. 4,  $a$ ). В вечерние часы (рис. 4,  $b$ ) при сильных возмущениях картина существенно иная: уровень магнитной активности не сказывался лишь до  $L \leq 2$ , при  $L > 2$  сильное повышение активности ( $K_p \geq 6$ ) сопровождается понижением температуры по сравнению со спокойными или умеренно возмущенными периодами. В интервале  $2 < L < 3$  средние температуры одинаковы в спокойные и умеренно возмущенные периоды, а при  $L \geq 3$  умеренные возмущения сопровождаются повышением  $T_i$  по сравнению со спокойными условиями. Необходимо при этом сделать следующую оговорку: выборка для сильно возмущенных условий ( $6 < K_p < 9$ ) составляет  $\leq 10$  случаев за интервал наблюдений, а спокойные и умеренно возмущенные условия наблюдались в 50–60 случаях за интервал. Несмотря на эту оговорку, требующую накопления большей статистики для сильных возмущений, понижение температуры внешней зоны плазмосферы в вечерние часы во время сильных возмущений заслуживает внимания. По-видимому, здесь необходим непосредственный анализ градиентов температуры в зависимости от уровня магнитной активности, поскольку повышение средней температуры на заданной  $L$ -оболочке с повышением  $K_p$ -индекса может быть связано с приближением к Земле вечерней плазмопаузы и ростом температуры, наблюдаемым при приближении к этой границе изнутри.

Сопоставление профилей  $T_i(L)$ , построенных по измерениям на больших и малых высотах (рис. 5,  $a, b$ ), выявили следующие различия между утренними и вечерними секторами. На утренней стороне (рис. 5,  $a$ ) во внутренней зоне ( $L \leq 3$ ) не наблюдается высотных изменений  $T_i$  при фиксированном значении  $L$ , так что профили  $T_i$  не различаются на разных высотах. Во внешней плазмосфере ( $L > 3$ ) температура плазмы на малых высотах оказывается более тесно связана с нижележащей холодной ионосферной плазмой, чем на больших высотах, т. е. наблюдаются значительные продольные градиенты температуры. На вечерней стороне (рис. 5,  $b$ ) во всей плазмосфере (независимо от  $L$ ) наблюдаются значительные продольные градиенты температуры. Это согласуется с охлаждением нижних слоев вечерней плазмосферы в результате охлаждения прилегающих слоев неосвещенной ионосферы.

Таким образом, во внешней плазмосфере ( $L > 3$ ) продольные градиенты существуют всегда, независимо от местного времени, а во внутренней — в вечерние часы, так что должны существовать потоки тепла вдоль силовых линий с источником в их вершинах.

Согласно [20], во внутренней плазмосфере наблюдается тепловое равновесие ионов гелия и водорода с точностью до  $\sim 10\%$ , при  $L > 3$  стан-

дартные часы. По-  
лись неа-  
температ-  
Резул-  
сформул-  
дований:  
1) ка-  
зованы в-  
вами окр-  
2) ка-  
мосферы  
3) по-  
ионов Не

Иссле-  
важное а-  
пример, л-  
диалом),  
мосфере,  
значно с-  
Выявл-  
имеет та-  
значител-  
модейств-  
дующего к-  
Перво-  
сферы на-  
ция ионов  
Измерени-  
( $\sim 0,001$   
метров н-  
(Между-  
впервые  
тора отпа-  
время ка-  
ляет  $\sim 0,0$   
ультрафи-  
их иониз-  
наблюдав-  
разумных  
силовой  
ренные о-  
Автор  
фузии дл-  
этом  $O^{++}$   
полнен в  
высоте  $\sim$   
трация и  
но падает  
Конце  
лась при  
эксперим-  
попов Не  
ке DE-1  
сколько  
ренням н-  
данных и



дартные отклонения  $T_{\text{He}}/T_{\text{H}}$  несколько возрастают, особенно в вечерние часы. Поскольку температуры ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{He}$  измерялись и анализировались независимо, это обстоятельство гарантирует надежность измерений температуры — параметра, для которого нет иных способов верификации.

Результаты исследования тепловой структуры плазмосферы позволяют сформулировать следующие проблемы дальнейших теоретических исследований:

1) каковы эффективные механизмы нагрева ионов? (Как они локализованы в пространстве и как связаны с солнечной активностью и свойствами окружающей плазмы?)

2) как объяснить перенос тепла, обеспечивающий нагрев ночной плазмосферы?

3) почему наблюдается столь высокая степень теплового равновесия ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ ?

### 3. Химический и зарядовый состав ионов плазмосферы

Исследование массового и зарядового состава ионов плазмосферы имеет важное значение для интерпретации простых зондовых измерений (например, в случае, когда используются анализаторы с тормозящим потенциалом), а также для выявления ионов, которые присущи именно плазмосфере, так что их обнаружение в других областях магнитосферы однозначно свидетельствует о плазмосферном происхождении этих ионов.

Выявление массового и зарядового состава плазмосферных ионов имеет также существенное теоретическое значение, поскольку даже незначительная примесь тяжелых ионов меняет условия резонансного взаимодействия горячих частиц кольцевого тока с холодной плазмой, приводящего к развитию неустойчивостей и нагреву внешней плазмосферы.

Первоначальные масс-спектрометрические измерения ионов плазмосферы на спутникеOGO-3 показали, что  $0,99 n_i$  ( $n_i$  — полная концентрация ионов) составляют протоны, а ионы  $\text{He}^+$  составляют  $0,01 n_i$  [24]. Измерения на спутникеOGO-5 впервые обнаружил ионы  $\text{O}^+$  ( $\sim 0,001 n_i$ ) [25]. По мере повышения чувствительности масс-спектрометров наблюдаемый спектр ионов стал обогащаться. В период МИМ (Международные исследования магнитосферы) на спутникеGEOS-1 впервые были зарегистрированы ионы  $\text{O}^{++}$  и оказалось, что вблизи экватора отношение  $n_{\text{O}^{++}}/n_{\text{O}^+}$  может достигать  $\sim 1$  на расстояниях  $L \sim 3$ , в то время как на средних широтах в слое ионосферы это отношение составляет  $\sim 0,003$ . Гейсс и Юнг [26] показали, что при фотоионизации ионов  $\text{O}^+$  ультрафиолетовым излучением Солнца на больших высотах, ни ударная их ионизация не могут обеспечить столь высокое отношение  $n_{\text{O}^{++}}/n_{\text{O}^+}$ , наблюдавшееся на спутникеGEOS-1. В то же время показано, что при разумных предположениях о распределении температуры ионов вдоль силовой трубки  $L=3$  в условиях равноденствия можно объяснить измеренные отношения  $n_{\text{O}^{++}}/n_{\text{O}^+}$  процессом тепловой диффузии.

Авторы [26] численно интегрировали нестационарное уравнение диффузии для ионов  $\text{O}^{++}$  вдоль силовой трубки внутри плазмосферы; при этом  $\text{O}^{++}$  рассматривается как малая составляющая плазмы. Расчет выполнен в предположении, что на высоте  $\sim 500$  км ( $L=3$ ),  $T_i=10^3$  К, а на высоте  $\sim 1300$  км (вблизи экватора) —  $T_i \approx 10^4$  К. Оказалось, что концентрация ионов  $\text{O}^{++}$  слабо зависит от скорости движения основного газа, но падает на два-три порядка при отсутствии термодиффузии.

Концентрация ионов  $\text{He}$  по измерениям на спутникеGEOS-1 оказалась приблизительно на порядок выше значений, полученных в ранних экспериментах и по данным Балсигера и Юнга [14] концентрация  $n_{\text{He}^+}$  ионов  $\text{He}^+$  достигает величины  $\sim 0,1 n_i$ . По данным измерений на спутникеDE-1 [27] во внешней плазмосфере ( $L > 3$ ) отношение  $n_{\text{He}^+}/n_{\text{H}^+}$  в несколько раз превышает соответствующие значения, полученные по измерениям на спутникеGEOS-1. Таким образом, на основании современных данных нельзя более рассматривать ионы  $\text{He}^+$  как малую компоненту

плазмосферных ионов, а следует считать, что плазмосфера состоит по меньшей мере из двух важных компонент.

Следует отметить, что авторы работ [14] и [27] не обсуждают вопроса о том, почему в последних экспериментах обнаружено столь высокое (по сравнению с прежними измерениями [24, 26]) содержание  $\text{He}^+$ , т. е. связано ли это с методикой измерений или отражает существенные временные вариации содержания этих ионов в плазмосфере. Таким образом, важный вопрос о содержании ионов  $\text{He}^+$  в плазмосфере до сих пор не может считаться окончательно решенным.

Измерения со спутника DE-1 впервые зарегистрировали также ионы  $\text{N}^+$  и  $\text{N}^{++}$ . Наблюдавшиеся значения потока ионов  $\text{N}^+$  составляют 0,05–0,01 величины потока ионов  $\text{O}^+$ , а потоки  $\text{N}^{++}$  составляют такую же долю (0,05–0,01) от потоков [28].

Результаты масс-спектроскопических измерений со спутника DE-1 позволили заключить, что в плазмосфере имеется тороидальная зона тяжелых ионов; пример распределения по  $L$ -оболочкам концентраций различных ионов по данным спутника DE-1 приведен на рис. 6 [27].

Поскольку ионы  $\text{O}^{++}$  и  $\text{He}^+$  присутствуют в земной атмосфере в малых количествах и практически отсутствуют в солнечном ветре, значительное их содержание в магнитосфере вне плазмосферы указывает на их плазмосферное происхождение и может использоваться при изучении циркуляции плазмы в магнитосфере.

Кроме того, наличие тяжелых ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{O}^{++}$  в плазмосфере существенно сказывается на процессах генерации и распространения ионно-циклотронных волн, поскольку присутствие даже малых примесей тяжелых ионов в холодной плазме и кольцевом токе снижает частоту ионно-циклотронного резонанса и скорость развития связанных с ними неустойчивостей; это обстоятельство необходимо учитывать при расчете нагрева внешней тепловой зоны плазмосферы, в частности для объяснения неравновесного состояния этой зоны с преимущественным нагревом ионов (при  $L > 3$ ,  $T_i > T_e$ ). Подробный анализ влияния примеси тяжелых ионов в холодной и энергичной компонентах плазмы во внешней зоне плазмосферы на генерацию и распространение ионно-циклотронных волн выполнен в работе Козыры и др. [29]. В работе приведена обширная библиография экспериментальных и теоретических исследований этих процессов и их влияния на структуру и нагрев внешней плазмосферы вплоть до плазмопаузы.

Согласно изложенным в обзоре [29] работам, учет примеси тяжелых ионов приводит к следующим основным результатам:

1) энергичные тяжелые ионы сорта  $\alpha$  вызывают раскачку колебаний с частотой  $f \leq f_\alpha$  ( $f_\alpha$  — циклотронная частота ионов сорта  $\alpha$ ) и подавляют волны с частотой  $f > f_\alpha$ ;

2) особо эффективно влияние тяжелых ионов сорта  $\alpha$ , если горячие и холодные ионы этого сорта присутствуют в соизмеримых количествах (например, в районе вечернего выступа при  $L < 4$  в кольцевом токе присутствуют горячие ионы  $\text{O}^+$  и  $\text{He}^+$  в той же пропорции с горячими протонами, что и в холодной плазмосферной плазме  $\text{H}^+ : \text{He}^+ : \text{O}^+ = 1 : 0,1 : 0,01$ ; при  $L > 4$  доминируют горячие протоны);

3) зона раскачки волн не коррелирует с градиентом плотности ионов  $\partial n / \partial L$  ( $L = L_{pp}$ ).

В присутствии примеси тяжелых ионов уменьшается фазовая скорость волны, что создает условия резонанса с ионами кольцевого тока вблизи соответствующих циклотронных частот  $f_{\alpha c}$  ( $\alpha$  — сорт ионов) даже при очень низкой плотности холодных частиц (например, при  $L > L_{pp}$ , т. е. за пределами плазмопаузы).

В применении к условиям в плазмосфере теоретические выводы, приведенные в [29], позволяют предположить, что неудачи тех волновых измерений на КА, в которых не удавалось зарегистрировать соответствующих излучений, объясняются именно описанным выше сдвигом резонансных частот в присутствии тяжелых ионов  $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$  и  $\text{N}^+$ . Это предположение подтверждается наземными наблюдениями. Впоследствии

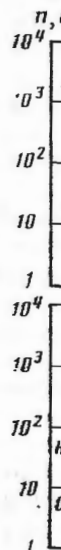


Рис. 6. спутник

Фрэйзе  
циклот  
в пери  
частоте  
мосфер  
горячи

Хан  
ных ду  
лиз, пр  
частота  
нансу  
ториал  
са на  
мос» [1  
Опи  
затуха  
сферы

4.

Пр  
ми иг  
плазм  
с учте  
расши  
требу  
ру). П  
за сче  
зуются  
шение  
кие вр  
мосфер  
плазм  
Экс  
на то,

лит по

вопро-  
сское  
+, т. е.  
е вре-  
бразом,  
пор не

е ионы  
авляют  
кую же

а DE-1  
она тя-  
ий раз-

малых  
гельное  
плазмо-  
ркуля-

ере су-  
ионно-  
сей тя-

ту пон-  
ими не-  
расчете

бъясне-  
агревом  
ажелых

ей зоне  
ых волн  
ширная  
ий этих  
осферы

ажелых

лебаний  
давляют

горячие  
нчества  
оке при-

ми про-  
=1 : 0,1 :

ти понов

скорость  
а вблизи  
аже при  
 $L_{pp}$ , т. е.

ды, при-  
волновых  
оответст-  
нгом ре-

то пред-  
дствии

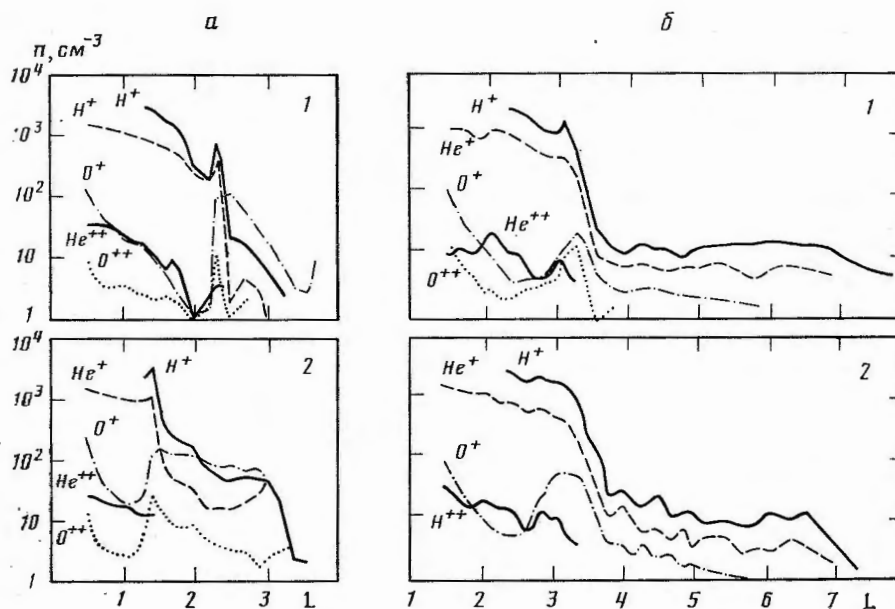


Рис. 6. Концентрации ионов различных элементов в зависимости от  $L$  по данным спутника DE-1 в вечернем секторе: а — 12.11.81 г., 1 — 03.19 — 03.35 UT, 2 — 09.50 — 10.21 UT; б — 13.XI.1981, 1 — 06.17 — 06.53 UT, 2 — 13.02 — 13.45 UT

Фрэйзер и др. [30] на спутнике ISEE-1, -2 зарегистрировали нециклотронные  $Pc2$  колебания вблизи вечерней плазмосферы ( $L=5,8-7,6$ ) в период заполнения плазмосферы на фазе восстановления суббури на частоте  $f_{рез}=0,1$  Гц, т. е. вблизи циклотронной части  $O^+$ . В составе плазмосферных ионов доминировали теплые (0–100 эВ) протоны, а среди горячих ионов присутствовали  $O^+$  и  $He^+$  (0,1–16 кэВ).

Хансен и др. [31] наблюдали пульсации видимого свечения авроральных дуг и ОНЧ-излучения на частоте  $f=1,3\pm 0,3$  Гц. Спектральный анализ, проведенный авторами [31], выделил также моду излучения на частотах 4 и 3,5 кГц, соответствующую электронно-циклотронному резонансу авроральных электронов в области на расстоянии 8000 км от экваториальной плоскости. ОНЧ-излучение вблизи ниже-гибридного резонанса на частотах  $f_{LHR}=4-18$  кГц наблюдалось на спутниках «Интеркосмос» [32] в виде дискретных эмиссий.

Описанные выше данные подтверждают предположения о том, что затухание Ландау ионно-циклотронных волн в условиях внешней плазмосферы может приводить к нагреву плазмы в этой области [33].

#### 4. Ионосферно-плазмосферный обмен заряженными частицами

Процессы ионосферно-плазмосферного обмена заряженными частицами играют определяющую роль в динамике плазмосферы. Заполнение плазмосферы за счет продольных потоков плазмы из дневной ионосферы с учетом всех стадий процесса (расширение в вакуум, гидродинамическое расширение, установление диффузионного равновесия в силовой трубке) требуют нескольких суток (см. [2, 3, 34] и цитированную там литературу). Процессы опустошения силовых трубок на плазмосферных высотах за счет оттока плазмы в ночную неосвещенную ионосферу характеризуются периодом  $t_g \leq 1$  сут; кроме того, аperiodически происходит опустошение внешней плазмосферы во время возмущений, за еще более короткие времена. Таким образом, пространственно-временная структура плазмосферы не может быть понята без детального исследования обмена плазмой в системе ионосфера — плазмосфера.

Экспериментальные данные последнего десятилетия указывают также на то, что ионосферная плазма, истекающая вдоль геомагнитного поля

из ионосферы на высоких широтах (полярный ветер, ионные фонтаны в области каспа и авроральной зоны, полярный дождь над полярной шапкой), поставляет холодную компоненту в более удаленные области магнитосферы (плазменный слой, хвост) и играет существенную роль в динамике магнитосферы в целом — в формировании и эволюции системы магнитосферной конвекции, в развитии красных дуг полярных сияний и других явлений. Эти процессы, в свою очередь, определяют динамику внешней зоны плазмосферы и формирование плазмопаузы [35].

Обмен потоками заряженных частиц между плазмосферой и ионосферой является одним из важных факторов, поддерживающих существование ночной ионосферы на средних широтах в отсутствие солнечного ультрафиолетового излучения. Этот аспект ионосферно-плазмосферных связей изучался теоретически и по косвенным экспериментальным данным на протяжении более 15 лет.

Анализ суточных вариаций экваториальных профилей  $n_i(L)$ , построенных по наблюдениям свистящих атмосфериков, позволил Парку [36] сделать вывод о существовании потоков частиц тепловых энергий из плазмосферы в ионосферу в ночное время  $\sim 1,5 \cdot 10^8$  и  $\sim 3 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  из ионосферы в плазмосферу в дневные часы. По данным некогерентного рассеяния на станции Милстон — Хилл ( $L=3,4$ ) Эванс [37] получил значения  $5 \cdot 10^7$  и  $3 \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для потоков частиц из ионосферы вверх и вниз (в ионосферу) соответственно, а по результатам [38] (та же обсерватория) дневной поток из ионосферы вверх на высоте 3000 км составляет  $(5-7) \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а ночной направленный вниз поток достигает  $1,5 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [38]. Оба результата относятся к максимуму солнечной активности.

По данным станции некогерентного рассеяния в Арисибо ( $L=1,4$ ) авторы [39] получили точные значения потоков ионов  $\text{H}^+$  из плазмосферы в ионосферу  $(2-6) \cdot 10^7$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в августе и  $\sim 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  — в январе 1975 г. Теоретические оценки ночных потоков частиц из плазмосферы, необходимых для поддержания в ночное время максимума слоя  $F$  на средних широтах, дают значения  $\sim 2 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [40], а для потоков  $\text{H}^+$  из ионосферы в плазмосферу из теоретических оценок получаются значения  $\sim 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [41]. Таким образом, оценки потоков, теоретические и по различным наземным излучениям (свистящие атмосферики, некогерентное рассеяние), достаточно сильно различаются ( $3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), так что необходимы прямые измерения потоков плазмы между плазмосферой и ионосферой для решения проблемы ночной ионизации среднеширотной ионосферы.

Такого рода измерение было выполнено на ракете «Вертикаль-10», запущенной на высоту до 1508 км в районе Волгограда ( $L=2$ ). Измерения проводились в интервале высот от вершины траектории (1508 км) до 1438 км [42].

В результате обработки кривых торможения (в предположении  $n_i \approx n_{\text{H}^+}$ ) было получено, что во время полета ракеты ионы  $\text{H}^+$  двигались из плазмосферы в ионосферу со скоростью  $v=0,8-1,4$  км/с. Потоки ионов из плазмосферы в ионосферу при этих скоростях лежали в пределах  $(0,8-4,0) \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Средняя величина потока в ночную ионосферу  $\sim 2,4 \cdot 10^8$   $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в принципе достаточна [42] для поддержания ночного слоя  $F$ , хотя одного измерения недостаточно для окончательного вывода о том, что потоки ионов из ночной плазмосферы являются определяющим источником ночного слоя  $F$  ионосферы.

## 5. Внешняя зона плазмосферы, плазмопаузы и их связь с крупномасштабными структурами магнитосферы

### 5.1. Внешняя зона плазмосферы и структурные границы во внутренней магнитосфере.

Результаты измерений на спутниках DE-1, -2 позволили Хоровицу и др. [27, 43] исследовать взаимосвязь между положением плазмопаузы и следующими границами плазменных структур во внутренней магнитосфере:

1) гр  
к анизо  
 $\alpha \approx 0^\circ$ ).  
плазмон  
2) в  
слоя с  
3) н  
Используй  
ные) из  
Набл  
основны  
сектору  
тронов с  
Плазмон  
совмест  
менени  
Отличие  
тронного  
перподи  
блюдаем  
период  
электро  
роты, из  
Хоро  
гут служ  
оставля  
MLT. А  
центрац  
их схема  
относите  
плато (С  
значител  
дений. П  
ней плаз  
Обнаруж  
наблюда  
сти пере  
Наиб  
симости  
ры [27,  
со значи  
градиент  
перехода  
основан  
руются  
и коротк  
градиент  
следую  
След  
к продо.  
[43], кв  
рактери  
Изме  
вблизи  
те на сп  
позволи  
плазмен  
ными в  
демонст  
рения.

1) граница перехода холодных ионов (Low Energy Ion Transition LEIT) к анизотропному продольному пичч-угловому распределению (пичч-угол  $\alpha \approx 0^\circ$ ). Эта граница часто наблюдается вблизи градиента плотности на плазмопаузе (вне плазмопаузы);

2) внутренний (обращенный к Земле) край электронов плазменного слоя с пичч-углами  $\alpha \approx 90^\circ$  и энергиями  $E_e = 100$  эВ; 10 кэВ;

3) низкоширотные границы авроральных электронов тех же энергий. Использовались также некоторые наземные и спутниковые (одновременные) измерения видимых полярных сияний.

Наблюдения [44, 45] проводились в вечернем и утреннем секторах; основные выводы работ [27, 43] относятся главным образом к вечернему сектору (18–23 MLT). Измерения показывают, что LEIT и граница электронов с  $E = 100$  эВ плазменного слоя обычно совпадают в пределах  $\pm 0,3L$ . Плазмопауза и обе эти границы, определенные независимо, перемещаются совместно по  $L$  соответственно изменению  $K_p$ -индекса: например, при изменении  $K_p$  от 5 до  $0^+$  границы смещаются с  $L_{\text{тр}} \approx 3-4$  на оболочку  $L_{\text{тр}} \approx 7$ . Отличие наблюдается лишь в поведении низкоширотной границы электронного аврорального овала: в этой области регистрируются короткопериодические флуктуации (временной масштаб суббурь). Причины наблюдаемых отличий могут быть связаны либо с большим орбитальным периодом спутника DE-1 (7,5 ч), либо с неопределенностью  $L$ -координаты электронных границ по данным DE-2, возрастающей с уменьшением широты, из-за более быстрого движения этого спутника по  $L$ .

Хоровиц и др. [27, 43] делают вывод, что исследованные границы могут служить индикатором положения плазмопаузы в вечернем секторе, оставляя открытым вопрос о динамике этих структур в других секторах MLT. Авторы [27, 43] выполнили статистический анализ профилей концентрации ионов во внешней плазмосфере (вблизи LEIT) и предложили их схематическую классификацию, приведенную на рис. 7. Оказалось, что относительно гладкие (без особенностей) профили (A) и ступенчатые плато (C) наблюдаются каждый в течение  $\sim 40\%$  времени, а профили со значительными провалами (D и E) занимают лишь 10% периода наблюдений. При этом «структурированные» профили характерны для вечерней плазмосферы, а профили без особенностей наблюдаются обычно утром. Обнаружено также, что наибольшие градиенты плотности вблизи LEIT наблюдаются ночью, в то время как плавный спад концентрации в области перехода доминирует в утренние часы.

Наиболее интересно сопоставить области градиентов профилей в зависимости от MLT с положением LEIT в этих координатах. Для этого авторы [27, 43] анализировали ступенчатые профили (C, рис. 7) и профили со значительными провалами (D и E, рис. 7). Оказалось, что внутренние градиенты плотности ( $L=3-4$ ) не зависят от MLT. Профили границы перехода (LEIT) имеют циркулярную форму при больших  $K_p$ . На этом основании можно ожидать, что внутренние градиенты плотности формируются при высокой магнитной активности (возможно, в ночные часы) и короткируют в другие секторы MLT, образуя циркулярную зону высоких градиентов, в то время как внешняя зона плазмосферы формируется в последующие спокойные периоды.

Следует подчеркнуть, что как плазмопауза, так и граница перехода к продольному распределению холодных ионов (LEIT), согласно данным [43], квазициркулярны в возмущенные периоды, а в спокойное время характеризуется значительным полуденным выступом.

Измерения электронной концентрации  $n_e$  в плазмосфере по излучению вблизи верхне-гибридного резонанса проводились в волновом эксперименте на спутнике ISEE-1 и описаны в работе Андерсона [46]. Эти измерения позволили сравнить основные структурные и динамические особенности плазмосферы, полученные на основе их анализа, с результатами прямых плазменных измерений, описанных в предыдущих разделах, а также с данными наземных наблюдений вистлеров [47]. Сопоставление данных продемонстрировало хорошее согласие всех трех независимых методов измерения. Следует подчеркнуть, что результаты Андерсона [46] надежно

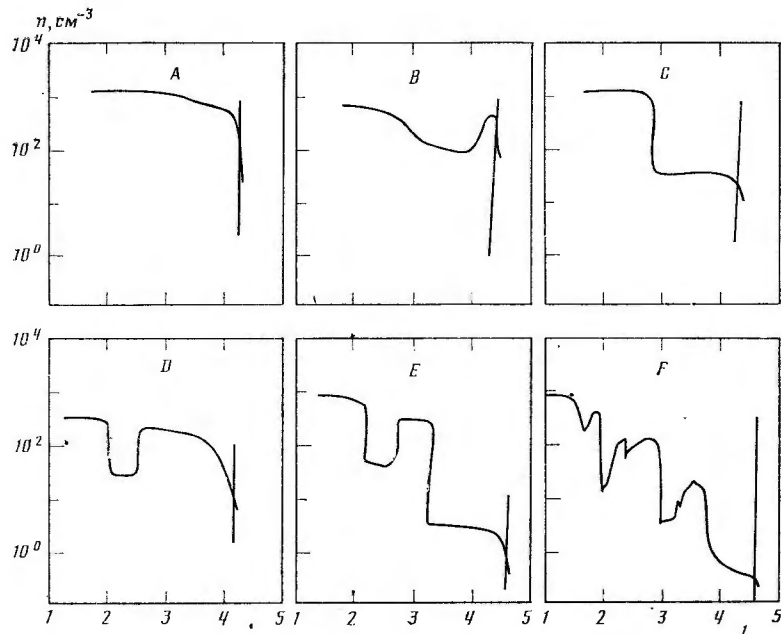


Рис. 7. Схематическая классификация типов распределения концентрации ионов вблизи плазмопаузы, вертикальная линия — положение LEIT

выделяют оба вида асимметрии плазмосферы (полуденно-полуночную и вечерне-утреннюю) в виде единого выступа, простирающегося с утренних до вечерних часов, причем размеры и локализация выступа зависят от концентрации, местного времени и уровня геомагнитной активности. Форма плазмопаузы по данным измерений [46] соответствует приведенной в работах [6–9].

Данные [43–45] подтверждают вывод Грингауза и Безруких [6] о значительной полуденно-полуночной асимметрии плазмопаузы в спокойные периоды, в то время как Чепелл и др. [48] на основании измерений со спутникаOGO-5 такой асимметрии не обнаружили, а авторы плазмосферного эксперимента на спутнике DE-1,2 в итоговой работе [27] также игнорируют эту проблему, хотя во время устного представления их доклада на сессии КОСПАР в Тулузе (1986 г.) продемонстрированные ими экспериментальные данные также содержали несомненные свидетельства полуденно-полуночной асимметрии плазмопаузы.

**5.2. Плазмопауза и ее связь с крупномасштабной конвекцией плазмы в магнитосфере.** Граница холодной изотропной плазмы — плазмопауза — в теоретических моделях обычно отождествляется с последней замкнутой эквипотенциалью электрического поля коротации и однородного поля магнитосферной конвекции, а сама плазмосфера — с областью, запрещенной для проникновения магнитосферной плазмы. Простейшая модель такого рода предложена около 20 лет назад Нишидой [49] и Брайсом [50]. Широкое распространение эта модель получила благодаря тому, что при разумных предположениях относительно электрического поля утро — вечер в хвосте магнитосферы  $E \approx 0,5$  мВ/м модель стационарной конвекции дает приемлемые экваториальные размеры плазмосферы и объясняет вечерний выступ экваториальной плазмопаузы. Однако эта МГД-модель предполагает суперпозицию потенциалов поля коротации и магнитосферной конвекции, что справедливо лишь в стационарном случае и при отсутствии продольных градиентов плотности и температуры, поэтому такие модели некорректны при учете нестационарного характера магнитного и электрического полей. Однако представление о плазмопаузе как о последней замкнутой эквипотенциали системы магнитосферной конвекции получило дальнейшее развитие в различных вариантах численных МГД-моделей нестационарной

ционарной литературы

МГД-моделей плазмосферы в докладах, что магнитное поле, и учитываются различные токи, и потери плазмы (взаимодействие сферных волн в МГД-модели), а также и питательный ток [51].

В результате короткопериодической полуденной асимметрии [51].

Действие исследования литературы в области основных полуденных моделях магнитосферы и магнитосферной конвекции Илвайнэ и др.

Недавние исследования плазмосферной квазистационарной L-оболочки после магнитосферной конвекции и плазмы

Наков и др. в работе, посвященной моделированию магнитосферного поля: взаимодействие водородоносной плазмы с горячей внешней плазмой циклотронно-тяжелых ионов противостоит недавнему исследованию смотра температуры с данными измерениями, более сущест

ционарной конвекции (см., например, [2, 34, 51] и цитируемую там литературу).

МГД-модели предполагают, что интегральная проводимость магнитосферы вдоль магнитного поля  $\Sigma_{\parallel} \rightarrow \infty$  вплоть до ионосферных высот, так что магнитные силовые линии являются эквипотенциалами электрического поля, и недооценивают роль ионосферы (в частности, обычно пренебрегают различием дневной и ночной проводимостей ионосферы). Ионосфера учитывается в МГД-моделях как зона протекания электрических поперечных токов, но не учитывается ионосферно-плазмосферный обмен плазмой и потери ионов за счет увлечения ими нейтралов в результате соударений (взаимодействие ионов с нейтралами особенно существенно при магнитосферных возмущениях с характерными временами  $\geq 10^5$  с). Кроме того, в МГД-моделях не рассматривается эффект механических сил (центробежной и гравитационной), который существенно изменяет пространственное иpitch-угловое распределение плазмосферных ионов и приводит к изменению формы плазмосферы.

В результате, МГД-модели нестационарной конвекции не описывают короткопериодических вариаций формы и размеров плазмосферы, а также ее полуденно-полуночной асимметрии, которая наблюдается экспериментально и существование которой следует из теоретических соображений [51].

Действие механических сил и развитие перестановочной неустойчивости исследовано Лемэром (см. монографию [34] и цитированную в ней литературу, разработавшим альтернативную (не МГД) трехмерную модель на основе учета этих процессов. Модель Лемэра позволяет объяснить основные особенности формирования плазмосферы, включая полуденно-полуночную асимметрию, которая не описывается существующими МГД-моделями. Однако следует иметь в виду, что распределение электрического и магнитного полей, которое использовано в расчетах Лемэра, построено Мак-Илвайном [52] путем экстраполяции экспериментальных данных, главным образом полученных на основе измерений с геостационарных спутников; это обстоятельство ограничивает применимость модели Мак-Илвайна для трехмерного теоретического описания процесса формирования плазмосферы.

Недавно была предпринята попытка построения эмпирической модели плазмосферы по измерениям со спутника DE [53]: построена усредненная квазистационарная картина распределения концентрации ионов  $H^+$  по  $L$ -оболочкам в условиях умеренной геомагнитной возмущенности вскоре после максимума солнечной активности (1981–1982); однако эта модель не описывает основных особенностей структуры внешней зоны плазмосферы и плазмосферы.

Наконец, динамика плазмосферы и формирование плазмосферы в период возмущений в значительной мере определяется развитием и распадом кольцевого тока [54]. Влияние кольцевого тока не сводится к возникновению магнитного возмущения и крупномасштабного электрического поля: взаимодействие горячих протонов кольцевого тока с нейтральным водородом геокороны приводит к образованию энергичных нейтралов [55]; затухание ионно-циклотронных волн в процессе взаимодействия с холодной плазмосферной плазмой может оказаться основным механизмом нагрева внешней зоны плазмосферы [33] и определяющим фактором динамики плазмосферы во время геомагнитных бурь. Процесс развития ионно-циклотронной неустойчивости в значительной мере зависит от содержания тяжелых ионов в составе холодной плазмы, относительно которого имеются противоречивые данные (см. Разд. 3). Авторам настоящего обзора был недавно прислан обширный материал [56], содержащий результаты пересмотра данных измерений со спутника GEOS-1 об полном составе, температуре и распределении концентрации тепловых ионов в сопоставлении с данными измерений со спутников ISEE-1 и DE, а также с наземными измерениями вистлеров в периоды низкой солнечной активности. Наиболее существенный результат этой работы состоит, на наш взгляд, в пересмотре и определенном уточнении высокого отношения концентраций

$\text{He}^+/\text{H}^+$ : по этим данным оно составляет 2–6% и возрастает в некоторых случаях до величины, близкой к единице. Данные [56] согласуются с результатами [27], но по мнению самих авторов эти результаты нуждаются в дальнейшем уточнении. Поэтому вопрос о соотношении концентраций ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  в плазмосфере пока остается открытым, что, естественно, затрудняет моделирование внешней плазмосферы и плазмоспаузы.

## 6. Выводы

Приведенные выше данные и их обсуждение позволяют заключить следующее:

1) плазмосфера и ее граница — плазмоспауза неоднородны и динамичны. Нередко дневная плазмоспауза имеет диффузный характер, менее резко выражена, чем ночная, так что не всегда можно определить ее положение;

2) разогретая («теплая») зона плазмосферы за пределом  $L=3$  почти всегда наблюдается в ночные часы и реже — в дневные. Внутренняя ( $L<3$ ) плазмосфера всегда холодная ( $T_i \leq 0,8$  эВ);

3) наряду с вечерним выступом плазмоспаузы в спокойных условиях ( $K_p=0-2$ ) почти всегда наблюдается полуденный выступ;

4) не ясны причины большого различия содержания ионов  $\text{He}^+$  в ионном составе плазмосферы по данным со спутников OGO-3, -5, GEOS-1, -2, DE-1;

5) в настоящее время не существует общепринятой теории формирования плазмоспаузы, которая объяснила бы особенности ее пространственно-временной структуры. Широко распространенная МГД-модель, в которой плазмоспауза отождествляется с последней замкнутой эквипотенциальной электрического поля магнитосферной конвекции, не объясняет следующих важных особенностей плазмоспаузы: а) полуденный выступ и диффузный характер дневной плазмоспаузы; б) наличие продольных градиентов плотности и температуры вблизи плазмоспаузы; в) нестационарные процессы с характерными временами от секунд до часа.

Очевидно, что для адекватного теоретического описания плазмосферы и плазмоспаузы помимо модели ионосферы необходимы данные о глобальном распределении  $E$  и  $B$  полей на основе координированных измерений со спутников и на сети наземных станций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грингауз К. И., Безруких В. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1977. Т. 17. С. 784.
2. Кринберг И. А., Тацилин А. В. Ионосфера и плазмосфера Земли. М.: Наука, 1984. 189 с.
3. Ораевский В. Н., Конииков В. Н., Хазанова Г. В. Процессы переноса в анизотропной околосферной плазме. М.: Наука, 1985. 171 с.
4. Gringauz K. I. // Adv. Space Res. 1985. V. 5. P. 391.
5. Грингауз К. И., Безруких В. В., Афонин В. В., Бассоло В. С. // Магнитосферные исследования 1988. № 10. С. 27.
6. Gringauz K. I., Bezrukich V. V. // J. Atmosph. Terr. Phys. 1976. V. 38. P. 1071.
7. Maynard N. C., Grebowsky J. // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 1591.
8. Carpenter D. L. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 45.
9. Ducreau P. M., Beghin E. C., Parrot M. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 695.
10. Higel B., Lei W. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 1583.
11. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д., Рыбчинский П. Е. // Докл. АН СССР. 1960. Т. 131. С. 1301.
12. Serbu G. P., Mayer E. J. R. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 6102.
13. Bezrukich V. V., Gringauz K. I. // J. Atmosph. Terr. Phys. 1976. V. 38. P. 1085.
14. Balsiger H. J. G., Young D. T. // Energetic ion composition in the Earth magnetosphere/Ed. R. C. Johnson. Tokyo, 1983. P. 195.
15. Lennartson W., Reasoner D. L. // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 2145.
16. Horowitz J. L., Chappel C. R. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 7075.
17. Baugher C. R., Chappel C. R., Horowitz J. L. et al. // J. Geophys. Res. 1980. V. 7. P. 6557.
18. Reasoner D. L., Graven P. D., Chappel C. R. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. P. 7913.
19. Balsiger H. J. G. // Adv. Space Res. 1981. V. 1. P. 289.
20. Comfort R. H. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 31.



21. Chappel C. R., Fields S. A., Baugher C. R. // Space Sci. Instrum. 1981. V. 5. P. 477.
22. Shelley F. G., Sharp R. D., Johnson R. G. et al. // ISEE Trans. Geosci. Electron. GE-16. 1978. P. 266.
23. Comfort R. H., Waite J. H. Jr., Chappel C. R. // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 3475.
24. Taylor H. A. Jr., Brinton H. C., Pharo M. V. III // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. P. 961.
25. Harris K. K., Sharp G. W., Chappel C. R. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 219.
26. Geiss J., Young D. T. // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 4739.
27. Horowitz J. L., Comfort R. H., Chappel C. R. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 21.
28. Chappel C. R., Olsen B. C., Green J. L. et al. // J. Geophys. Res. 1982. V. 9. P. 937.
29. Kozyra J. U., Gravens T. E., Nagy A. F., Fontheim E. G. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 2217.
30. Fraser B. J., Samson J. C., McPherron P. L., Russel T. C. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 223.
31. Hansen H. J., Scourfield M. W. J., Rash J. R. S. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 227.
32. Boskova J., Jiricek F., Smilauer J., Triska P. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 231.
33. Galeev A. A. // Physics of hot plasma in the magnetosphere Eds B. K. Hulqvist, L. Stenflo. N. Y.; L.: Plenum Press, 1975. P. 251.
34. Lemaire J. «Frontiers of the Plasmasphere» (Theoretical aspects), CABAY. Louvain-la-Neuve. 1985. P. 294.
35. Chappel C. R. // Res. Geophys. 1988. V. 26. P. 229.
36. Park C. G. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4249.
37. Evans J. V. // Planet. Space Sci. 1975. V. 23. P. 1611.
38. Marubashi K., Grebowsky J. H. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. P. 1700.
39. Vickrey J. F., Swartz W. E., Early D. T. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 1310.
40. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1977. Т. 13. С. 47.
41. Banks P. M., Nagy A. F., Axford W. J. // Planet. Space Sci. 1971. V. 19. P. 1053.
42. Афонин В. В., Бецце П., Безруких В. В. и др. // Космич. исслед., 1984. Т. 22. С. 884.
43. Horowitz J. L., Mentneer S., Turnley J. et al. // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 8861.
44. Burch J. L., Winningham J. D., Blevins V. A. et al. // Space Sci. Instrum. 1981. V. 5. P. 455.
45. Winningham J. D., Burch J. L., Eaker N. // Space Sci. Instrum. 1981. V. 5. P. 465.
46. Anderson R. R. Частное сообщение.
47. Carpenter D. L. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 5.
48. Chappel C. R. // Rev. Geophys. 1972. V. 10. P. 951.
49. Nishida A. // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 855.
50. Brice N. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 5193.
51. Wolf R. A., Mantjoukis G. A., Spiro R. V. // Adv. Space Res. 1986. V. 6. P. 177.
52. McIlwain C. E. // «Earth magnetospheric processes» (Ed. B. M. McCormac), Dordrecht: D. Reidel, 1972. P. 268.
53. Gallagher D. L., Graven P. D., Comfort // Adv. Space Res. 1988, V. 8, P. 15.
54. Gringauz K. I. // Space Sci. Rev. 1983, V. 34, P. 254.
55. Williams D. J. // Rev. of Geophys. 1987, V. 25, P. 570.
56. Frugra C. J., Yong D. T., Geiss J., Balsiger H. // Adv. Space Res. 1988. V. 8. P. 25.

Институт космических  
исследований АН СССР

Поступила в редакцию  
19.01.89