

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ  
И  
АЭРОНОМИЯ

Том XVII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

---

МОСКВА · 1977

УДК 550.383

## ПЛАЗМОСФЕРА ЗЕМЛИ

## Обзор

*К. И. Грингауз, В. В. Безруких*

Верхняя граница холодной плазменной оболочки Земли была обнаружена в 1959 г. во время прямых измерений ионной компоненты на трассе Земля — Луна, проводившихся на первых лунных ракетах. В четырех идентичных ионных ловушках, фиксированные электрические потенциалы внешних сеток которых отличались друг от друга на единицы вольт, были зарегистрированы токи, величины которых зависели от указанных потенциалов. Токи во всех четырех ловушках резко падали на некотором расстоянии от Земли. В работе [1], опубликованной в 1960 г., был сформулирован следующий вывод: «На расстояниях  $R$  от поверхности Земли до 4 земных радиусов обнаружена плазма с температурой не более десятков тысяч градусов». Дополнительный анализ указанных результатов, проведенный в 1960—1961 гг. [2, 3], подтвердил этот вывод.

В 1963 г. выяснилось, что в США Д. Л. Карпентером был независимо обнаружен резкий спад концентрации электронов  $n$ , в плоскости геомагнитного экватора при интерпретации результатов наземных наблюдений свистящих атмосфериков [4]. Этот спад в [4] был отождествлен с областью резкого спада концентрации ионов  $n$ , обнаруженной при помощи советских лунных ракет [1—3]. Следует иметь в виду, что по данным наземных наблюдений свистящих атмосфериков можно определить  $n$ , только в экваториальной плоскости и нельзя получить информацию об энергии частиц  $n$ , следовательно, определить, к холодной или горячей плазме они относятся [4, 5].

В настоящее время общепринятым для холодной плазменной оболочки является название «плазмосфера», а для области резкого спада концентрации холодной плазмы — название «плазмопауза».

В 1964 г. были проведены первые измерения концентрации ионов в плазмосфере на советских спутниках «Электрон-2» и «Электрон-4» [6, 7] и первые масс-спектрометрические измерения ионной компоненты плазмосферы на американском спутникеOGO-1 [8].

Сопоставления данных наземных наблюдений свистящих атмосфериков и спутниковых измерений [8] позволили Карпентеру в 1966 г. предложить модель плазмосферы, в которой плазмопауза в меридиональной плоскости проходит вдоль геомагнитной оболочки ( $L$ -оболочки) [8]. Совокупность данных последующих спутниковых измерений подтверждает правильность такой модели.

Плазмосфера является периферийной частью ионосферы, содержащей ионы земного происхождения; главным образом ионы водорода с небольшой добавкой ионов однократно ионизованного гелия (концентрация последнего в плазмосфере не превышает нескольких процентов от концентрации протонов). Ионы водорода, заполняющие плазмосферу, образуются в результате диссоциации молекул воды в верхней атмосфере и последу-

ющей ионизации в реакции перезарядки  $H+O^+ \rightleftharpoons H^++O$ , которая эффективно осуществляется в области ионосферы, где частота соударений достаточно велика. В зависимости от времени суток и фазы цикла солнечной активности верхняя граница этой области лежит на высотах от 600 до 1000 км. Образовавшиеся в реакции перезарядки ионы водорода транспортируются в плазмосферу в результате диффузии вдоль силовых трубок геомагнитного поля. Днем потоки заряженных частиц направлены снизу вверх, в результате плазма ионосферного происхождения заполняет плазмосферу, а ночью потоки заряженных частиц направлены из плазмосферы в ионосферу и частично ответственны за поддержание ночной ионосферы.

Принято условно считать, что нижняя граница плазмосферы расположена на высоте  $\sim 1000$  км.

Верхняя граница плазмосферы — плазмопауза — представляет собой область, в которой на радиальном расстоянии, составляющем обычно некоторую долю земного радиуса, концентрации заряженных частиц падает более чем на порядок величины (часто на 2–3 порядка). При теоретическом рассмотрении формирования плазмопаузы ее часто идеализируют, представляя как поверхность, совпадающую с  $L$ -оболочкой, через которую поток холодной плазмы равен нулю. Легко убедиться, что такая поверхность является эквипотенциальной (ибо электрическое поле вдоль этой поверхности  $E = -1/c[B \times v]$ , где магнитное поле  $B$  совпадает с касательной к поверхности, а  $v$  — нормальная к поверхности скорость плазмы равна нулю по определению).

Так как плазмопауза может рассматриваться как эквипотенциаль, естественно предположить, что ее положение должно быть тесно связано с распределением электрического потенциала внутри магнитосферы, а следовательно, с крупномасштабными электрическими полями в магнитосфере и с конвекцией магнитосферной плазмы, определяющей эти поля.

Указанные представления сформировались к концу 60-х годов в результате прямых измерений в плазмосфере (при помощи космических аппаратов), наземных радиофизических наблюдений (анализа свистящих атмосфериков) и некоторых теоретических работ [1–25].

Число работ, посвященных физике плазмосферы и связанным с ней проблемам, в 1960–1966 гг. измерялось единицами; оно стало возрастать к концу 60-х годов и резко возросло в 70-х годах. Оказалось, что с плазмосферой связаны многие и разнообразные физические явления: электрические поля в магнитосфере (например, [15, 24]), распространение низкочастотных радиоволн в околоземном пространстве [4, 5], крупномасштабные вариации радиационных поясов [26], генерация короткопериодных колебаний электромагнитного поля Земли [27] и различных радиошумов [28], распад внеземного кольцевого тока [29, 30], понижение электрического потенциала геостационарных спутников после их зарядки до весьма высоких потенциалов при инжекции горячей плазмы из хвоста магнитосферы в область с  $L > 7$  [31, 32], возникновение «стабильных красных дуг» [29, 33] и т. д.

В 1974 г. в Триесте состоялся международный семинар по физике плазмопаузы [34], на котором было представлено около 20 докладов (в основном обзорных); в 1975 г. в Гренобле в рамках Ассамблеи МАГА состоялся еще один международный симпозиум по физике плазмосферы, где было представлено около 30 докладов [35]. Разумеется, в рамках одного журнального обзора невозможно даже кратко отразить все многообразие материалов и проблем, рассматриваемых на таких симпозиумах, поэтому настоящий обзор посвящен лишь некоторым проблемам, в исследовании которых участвовали его авторы, — зависимости положения плаз-

молпаузы от местного времени и тепловой структуре плазмосферы, а также некоторым вопросам, тесно связанным с этими проблемами. При этом основное внимание уделяется результатам, полученным в течение последних пяти лет.

### 1. Об измерениях концентрации и температуры заряженных частиц в плазмосфере.

#### Плазмосферные измерения на спутниках серии «Прогноз»

Основные трудности при измерениях при помощи различных типов плазменных зондов и ионных масс-спектрометров, установленных на космическом аппарате, летящем в плазмосфере, связаны с электрическим потенциалом аппарата относительно окружающей среды. Возникающие проблемы были темой специального симпозиума, проведенного в 1972 г. в Варшаве, организованного УРСИ, и рассматриваются в ряде статей, большая часть которых принадлежит Э. Уинплу и его соавторам [36—40]. Величина электрического потенциала космического аппарата зависит от многих факторов, в частности от соотношения величин тока фотоэмиссии и вторичной электронной эмиссии с его поверхности и потоков заряженных частиц, попадающих на него, от материала корпуса аппарата, его покрытия и обработки поверхности и даже от параметров и режима работы телеметрического радиопередатчика (антенна может отрицательно зарядить аппарат, так как потоки электронов, попадающих на нее из окружающей среды во время положительной полувольты высокочастотного напряжения, намного превышают потоки ионов во время отрицательной полувольты).

В ряде случаев авторам экспериментов в плазмосфере, пользуясь различными признаками, удалось оценить электрические потенциалы спутников в плазмосфере. Так, потенциал «Электрон-2» на расстояниях от Земли  $R$  более двух земных радиусов был мал (по сравнению с  $kT$ ) [6], потенциал ОГО-1 составлял  $-9$  в ионосфере и повышался до нуля вблизи плазмоспаузы [41]. Авторы [42] отмечали, что потенциал ОГО-5 в плазмосфере был неположителен. Потенциал космического аппарата можно учитывать при использовании для ионных измерений анализаторов с тормозящими потенциалами. Однако в ряде случаев по различным соображениям используются детекторы плазмы без меняющихся тормозящих потенциалов на одной из сеток (например, масс-спектрометры на спутниках ОГО-1, ОГО-3 и ОГО-5, ловушки заряженных частиц на спутниках «Электрон-2», «Электрон-4», «Прогноз», «Прогноз-2», «Прогноз-3», «Прогноз-4»). В этих случаях обработка данных (переход от измеренных ионных токов к величинам концентраций ионов) обычно ведется в предположении нулевого потенциала космического аппарата. Заметим, что из всех спутников серии «Прогноз», запущенных до настоящего времени, только на «Прогнозе-5» были установлены плоские анализаторы с тормозящими потенциалами для плазмосферных измерений. Рассмотрение зарегистрированных на «Прогнозе-5» кривых торможения позволяет сделать вывод, что электрический потенциал «Прогноза-5» в низкоширотной и среднеширотной плазмосфере (геомагнитная широта  $\lambda \leq 45^\circ$ ) был отрицательным, а его величина не превышала  $1$  в.

Пользуясь результатами измерений на «Прогнозе-5» и перенося эти результаты на другие спутники серии, так как конструкция пяти запущенных спутников «Прогноз» и режимы работы их передатчиков практически идентичны (т. е. электрические потенциалы у этих спутников при

одинаковых внешних условиях одинаковы), и пользуясь теорией [39], можно сделать вывод, что определение ионной концентрации по данным ионных ловушек, установленных на спутниках «Прогноз», с внешними сетками, имеющими потенциал корпуса спутника, в предположении нулевого потенциала спутника, приводит к ошибкам в  $n_i$ , не превышающим фактора 2.

Определение ионной температуры  $T_i$  методом тормозящих потенциалов общеизвестно, поэтому остановимся подробнее на методе определения  $T_i$ , примененном при обработке результатов со спутника «Прогноз».

На «Прогнозе» в числе других плазменных детекторов были установлены две ловушки с полусферическими внешними сетками, электрически соединенными с корпусом спутника, и с плоскими коллекторами [43]. Одна из них была ориентирована на Солнце, вторая, установленная на затененной части спутника, ориентирована в антисолнечном направлении. Метод определения  $T_i$  основан на том, что в системе координат, связанной со спутником, скорости ионов анизотропны, и две ловушки, ориентированные различным образом относительно вектора скорости спутника (т. е. относительно скорости набегающего потока ионов), регистрируют различные токи. Отношение этих токов зависит от анизотропии в пространстве скоростей ионов и может быть использовано для определения  $T_i$ . В плазмосфере ловушка регистрирует коллекторный ток

$$I_i = n_i G(T_i, v, \alpha_i), \quad (1)$$

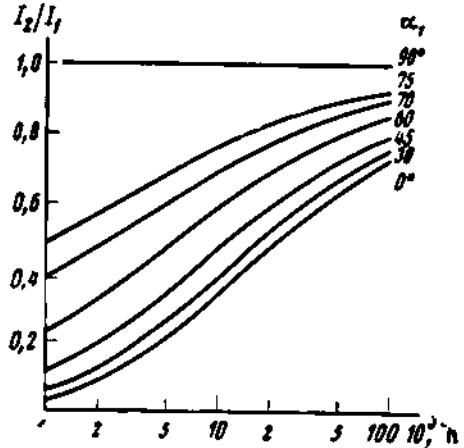
где  $n_i$  — концентрация ионов;  $G$  — функция, полученная в результате интегрирования произведения аппаратурной функции ионной ловушки\* на скорость протонов и на функцию распределения протонов по пространству скоростей (предполагается, что функция распределения протонов максвелловская и что вклад более тяжелых ионов в плазмосфере можно не учитывать);  $v$  — скорость спутника;  $\alpha$  — «угол атаки» ловушки (угол между направлением скорости спутника и нормалью к коллектору ловушки).

Отношение токов  $I_{i1}$  и  $I_{i2}$ , зарегистрированных двумя различно ориентированными ловушками

$$\frac{I_{i1}}{I_{i2}} = \frac{G(T_i, v, \alpha_1)}{G(T_i, v, \alpha_2)} \quad (2)$$

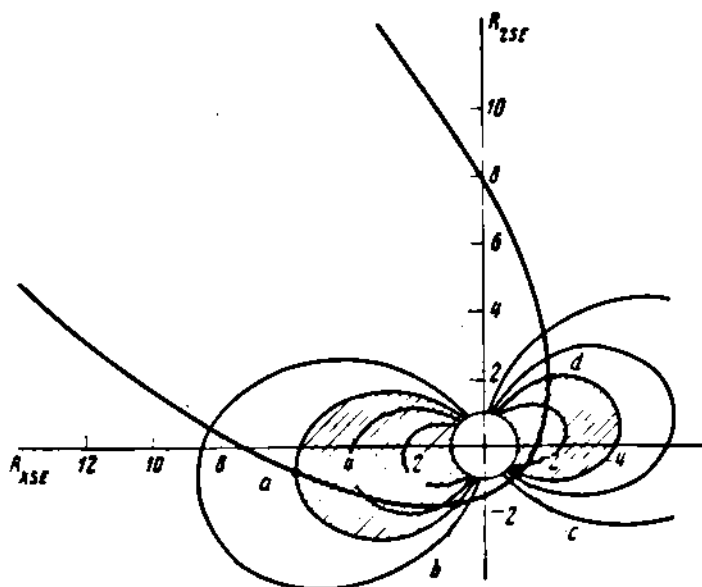
(в случае если измерения  $I_{i1}$  и  $I_{i2}$  выполнены практически одновременно). Если  $v$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  известны, то единственным неизвестным в (2) является  $T_i$ .

На спутнике «Прогноз»  $\alpha_1 = 180^\circ - \alpha_2$ , величины  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определялись по траекторным данным. В измеряемые величины коллекторного тока освещенной Солнцем ловушки были внесены поправки на фототок с коллектора. На фиг. 1 приведена зависимость  $I_{i2}/I_{i1} = F(T)$  при различных  $\alpha_1$

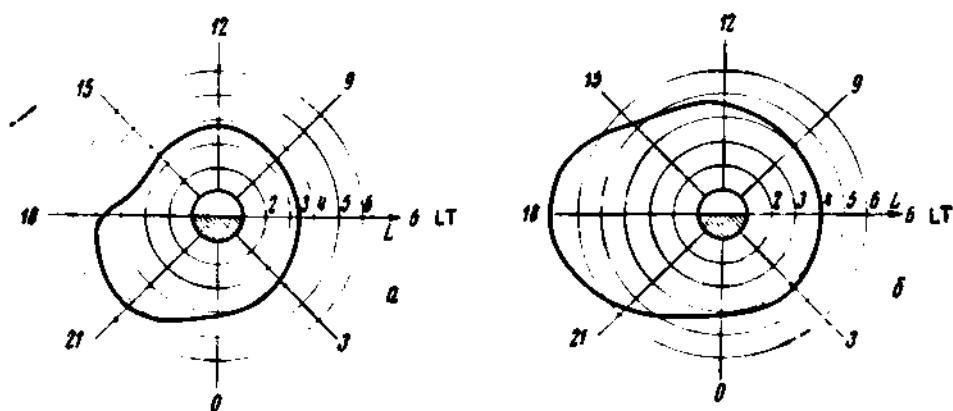


Фиг. 1

\* Под аппаратурной функцией понимается зависимость коллекторного тока от скорости частиц и от угла между скоростью и нормалью к коллектору ловушки.



Фиг. 2



Фиг. 3

для скорости спутника  $v=5$  км/сек (рассчитанная в предположении нулевого потенциала спутника). Видно, что при уменьшении наклона кривых точность определения  $T_i$  уменьшится. Поэтому для определения  $T_i$  были использованы значения отношения токов, измеренных при углах атаки  $\alpha, \leq 60^\circ$ . Это ограничение позволило определить  $T_i$  только в дневной части плазмосферы. Относительная погрешность измерения  $T_i$ , связанная с ошибками измерения токов и определения углов атаки датчиков, составляет  $\sim 25\%$ .

Спутник «Прогноз» был запущен 14.IV 1972 г., «Прогноз-2» — 29.VI 1972 г. Начальные параметры их орбит были довольно близки друг к другу, апогей —  $201 \cdot 10^3$  км, перигей —  $10^3$  км, наклонение  $\sim 65^\circ$ , период — 97 час. Каждый из спутников во время каждого оборота вокруг Земли пересекал плазмосферу 4 раза на различных высотах. В качестве иллюстрации этого на фиг. 2 приведена проекция околосемного участка орбиты

спутника «Прогноз» на плоскость  $X, Z$  солнечно-эклиптической системы координат 28.V 1972 г. (точки  $a, b, c, d$ ).

На спутниках «Прогноз-3» и «Прогноз-4», запущенных на орбиты того же типа соответственно 12.II 1973 и 22.XII 1975 гг., также имелись ионные ловушки для исследования плазмосферы с фиксированными потенциалами на сетках, и только на спутнике «Прогноз-5», запущенном в ноябре 1976 г., как уже упоминалось, были дополнительно установлены две плоские ионные ловушки с тормозящими потенциалами. Обработка данных с этих спутников еще не завершена, и в настоящем обзоре использованы лишь результаты измерений со спутников «Прогноз» и «Прогноз-2», приведенные в работах [44–46].

## 2. Суточные изменения высоты плазмопаузы (форма плазмопаузы в плоскости геомагнитного экватора)

Экспериментальные данные. Будем обозначать высоту плазмопаузы от центра Земли в экваториальной плоскости, выраженную в земных радиусах, как  $L_{\text{p}}$  ( $L$  — координата Мак-Илвейна).

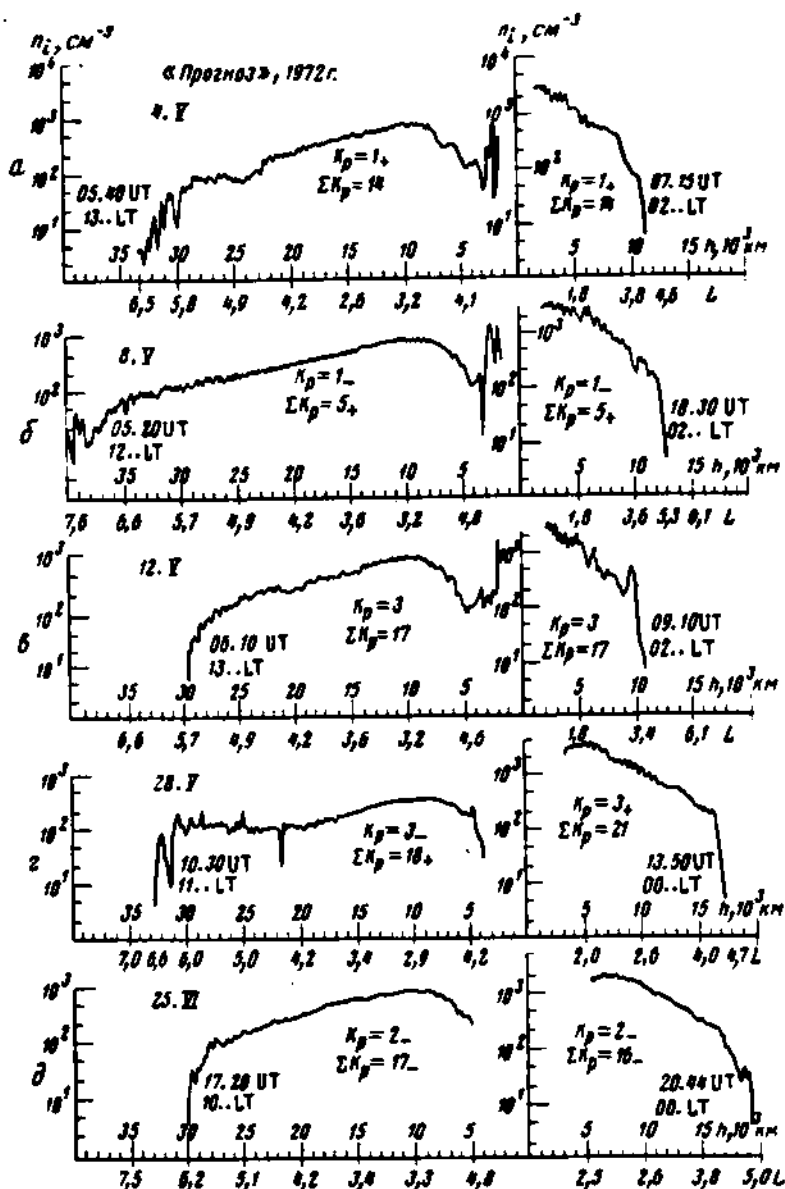
Первые сведения о суточных изменениях  $L_{\text{p}}$  были получены по данным наблюдений свистящих атмосфериков [9]. Важной особенностью этих изменений (показанных на фиг. 3а) является повышение  $L_{\text{p}}$  в вечерние часы, за которым закрепилось название «вечерняя выпуклость». Измерения локальной концентрации ионов на спутниках, в частности на «Электроне-2» и «Электроне-4» [6, 7] и ОГО-1, ОГО-3 и ОГО-5 [8, 22, 25] также показали увеличение высоты плазмопаузы в вечерние часы, причем по данным наблюдений на ОГО-5 эта выпуклость в среднем симметрична относительно меридиана 06 ч. 00 м. — 18 ч. 00 м. — фиг. 3б.

По данным как наземных, так и спутниковых измерений  $L_{\text{p}}$  сильно зависит от геомагнитной активности — уменьшается с ростом геомагнитных возмущений. В [19, 47, 48] предложены эмпирические формулы для определения  $L_{\text{p}}$ ; некоторые авторы предпочитают при определении  $L_{\text{p}}$  пользоваться данными о  $K_p$ -индексах за время, предшествующее времени определения  $L_{\text{p}}$  на 12–24 часа (имея, очевидно, в виду некоторую инерцию реакции плазмопаузы на изменения геомагнитной обстановки) [45, 47, 48], другие, например, Бинзак, рекомендовавший формулу  $L_{\text{p}} = 6 - 0,6 K_p$  [19], используют значение  $K_p$ -индекса, соответствующее времени определения  $L_{\text{p}}$ .

Большинство результатов измерений  $L_{\text{p}}$  свидетельствует о том, что вечерняя выпуклость является наибольшей в магнитно-спокойные периоды и существенно уменьшается с ростом геомагнитных возмущений.

Заметим, что в обоих экспериментальных графиках  $L_{\text{p}}$  ( $L_T$ ), приведенных на фиг. 3а и 3б, наиболее широко использовавшихся в литературе, имеется отчетливая вечерняя выпуклость и отсутствует существенное различие высот плазмопаузы между полуднем и полуночью. В [51] рассмотрен ряд особенностей дневной плазмосферы по данным наблюдений на спутнике ОГО-5, однако в числе этих особенностей не отмечается асимметрии плазмосферы относительно меридиана 6–18 час. (т. е. в направлении полдень — полночь).

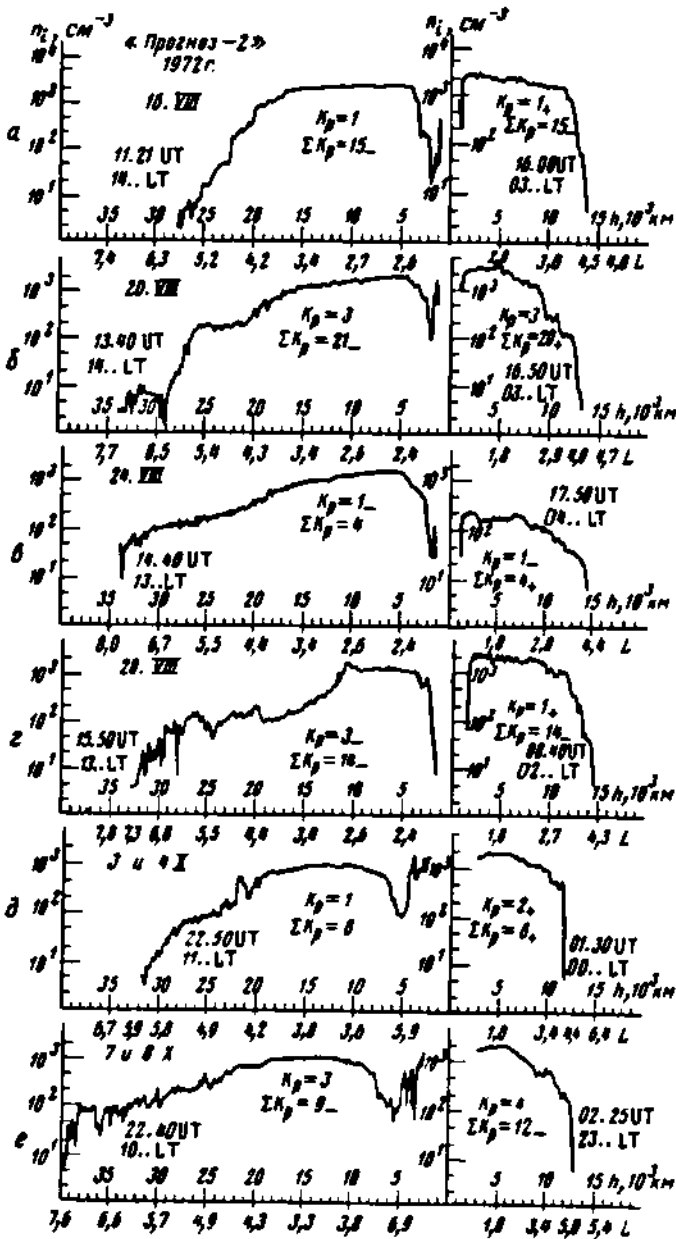
Результаты измерений, проведенных на спутниках «Прогноз», в некотором отношении противоречат данным [9] и [51]; они показали, что именно в магнитно-спокойные периоды существует сильная дополнительная асимметрия плазмопаузы  $\Delta L_{\text{p}}$ , которую можно назвать «дневной выпуклостью». Эта асимметрия по величине иногда сопоставима с вечерней выпуклостью.



Фиг. 4

На фиг. 4–7 приведены высотные профили ионной концентрации, полученные со спутников «Прогноз» и «Прогноз-2». Левая часть каждого графика соответствует нисходящему участку орбиты спутника, а правая — восходящему. Вдоль оси абсцисс отложены дополнительно к высотам  $L$ -координаты спутника; высоты на нисходящих участках меняются монотонно;  $L$ -координаты проходят через минимум (фиг. 4–7). На каждом графике приведены универсальное время UT и местное LT, соответствующее двум указанным выше пересечениям границы плазмосферы; спутник проходит рассматриваемый участок орбиты от первого входа в плазмосферу до последнего выхода на нее за 3–5 час., при этом местное время меняется на 10–14 час. Кроме того, на левой части каждого из  $n_i(L)$ -распре-

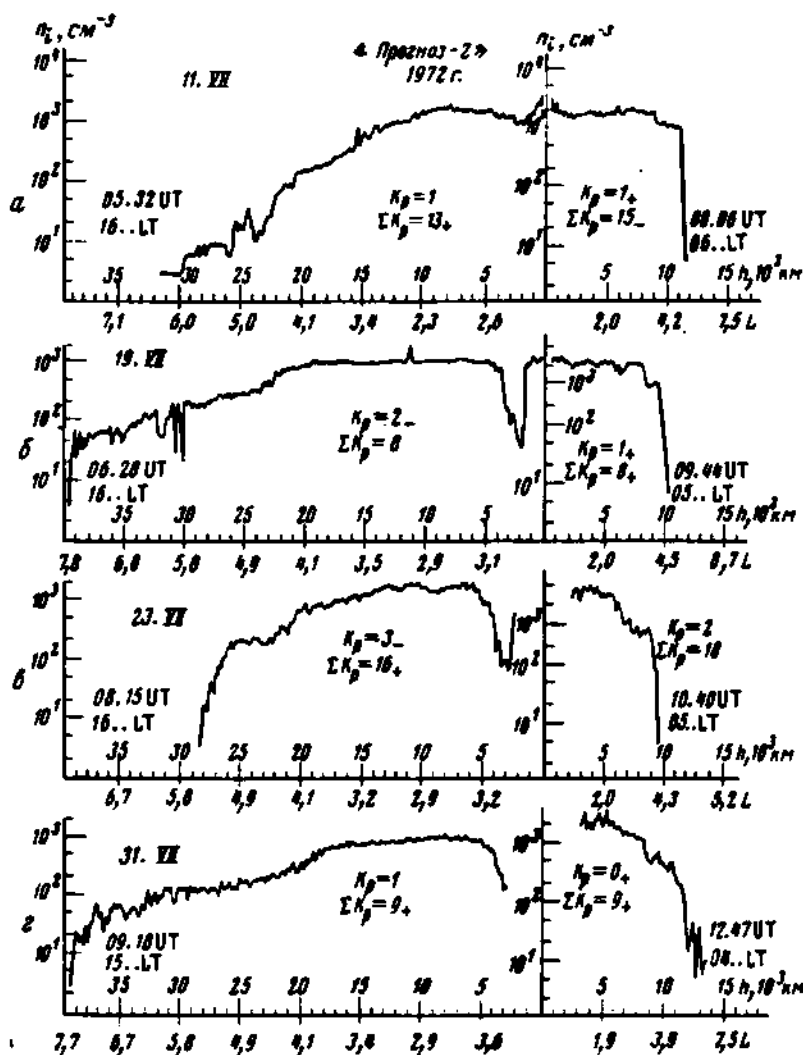




Фиг. 3

делений приведены значения  $K_p$ , соответствующие входу спутника в плазмосферу на нисходящем витке, и суммы  $K_p$ -индексов за сутки, предшествующие входу спутника в плазмосферу. На правой части — значения  $K_p$ , соответствующие выходу спутника из плазмосферы и сумма  $K_p$ -индексов за сутки, предшествующие выходу спутника из плазмосферы.

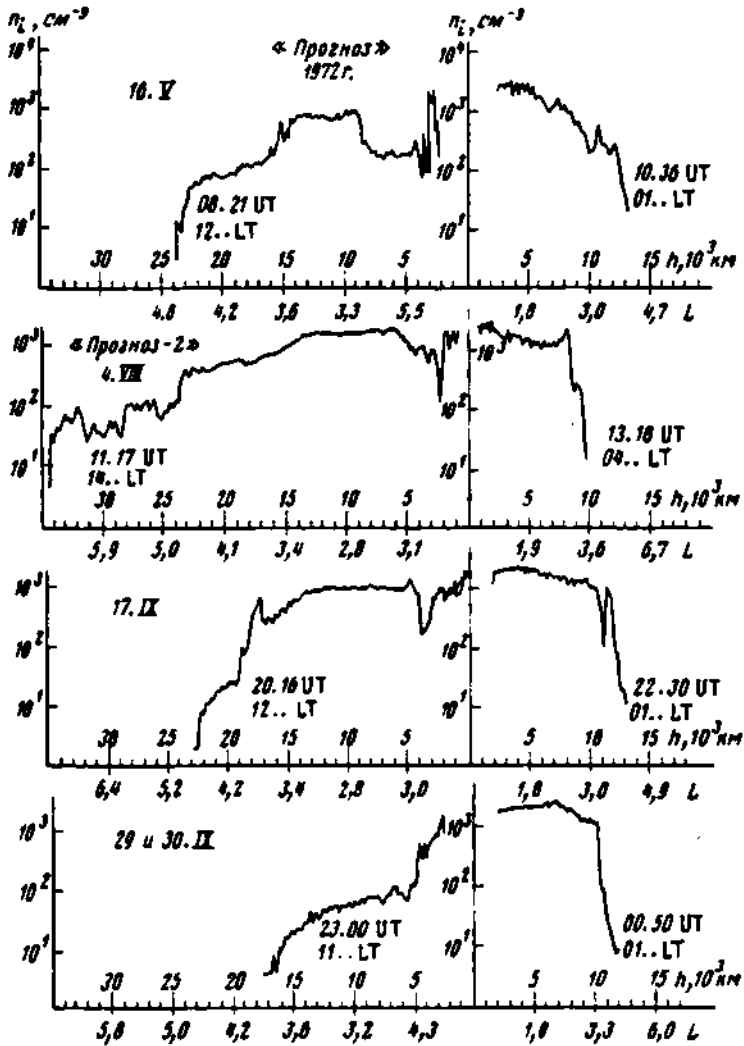
На фиг. 4 приведен ряд  $n_e(L)$ -профилей, полученных со спутника «Прогноз» в магнитоспокойные и умеренно магнитно-возмущенные периоды (во время намерений  $K_p \leq 3$ , сумма  $K_p$  за сутки, предшествующие



Фиг. 6

выходу спутника из плазмосферы  $\Sigma K_p \leq 21$ ). Местное время в момент входа спутника в плазмосферу на нисходящем участке 10 ч. 00 м. — 14 ч. 00 м. LT, при выходе из плазмосферы 22 ч. 00 м. — 02 ч. 00 м. LT.

На фиг. 5 приведены аналогичные данные со спутника «Прогноз-2»; при выходе из плазмосферы на восходящем участке у этой группы данных местное время соответствует интервалу от 23 до 04 час. LT. На каждой паре приведенных на фиг. 4 и фиг. 5 графиков можно видеть существенные различия между  $n_e(L)$ -профилями, полученными вблизи местного полудня и местной полуночи. Прежде всего величина  $L_p$  на дневной стороне значительно больше, чем на ночной (это отличие нигде не меньше одной  $L$ -единицы, а в большинстве случаев существенно больше). Кроме того, для графиков  $n_e(L)$  на фиг. 4 и фиг. 5, соответствующих дневной плазмосфере, типично более постепенное уменьшение  $n_e$  по сравнению с реактивными спадами  $n_e$  вблизи ночной границы плазмосферы. В некоторых



Фиг. 7

случаях (фиг. 4а, б, фиг. 5а, в) уменьшение  $n_e$  на дневной стороне сопровождается заметными колебаниями величин  $n_e$  (при  $n_e < 10^2 \text{ см}^{-3}$ ), не наблюдаемыми на ночной стороне. На фиг. 6, относящейся также к спокойным геомагнитным условиям, можно сравнить  $n_e(L)$ -профили (15 ч. 00 м. — 16 ч. 00 м. LT) с утренними профилями (04 ч. 00 м. — 06 ч. 00 м. LT). Видно, что в послеполуденные часы сохраняются как значительная протяженность плазмосферы, так и сравнительно медленный спад  $n_e$ , тогда как для утреннего сектора, как и для ночного, характерна четкая плазмпануза, расположенная на сравнительно малых  $L$ .

На фиг. 7 приведены  $n_e(L)$ -профили, относящиеся к магнитно-возмущенным условиям. Видно, что асимметрия дневной и ночной плазмосферы в магнитно-возмущенные периоды уменьшается.

Асимметрию плазмосферы относительно меридиана 06 час. — 18 час. LT (в направлении полдень — полночь) для каждого пролета спутника можно оценить величиной  $\Delta L_{n_e} = L_n - L_m$ , где  $L_n$  —  $L$ -координата полуден-

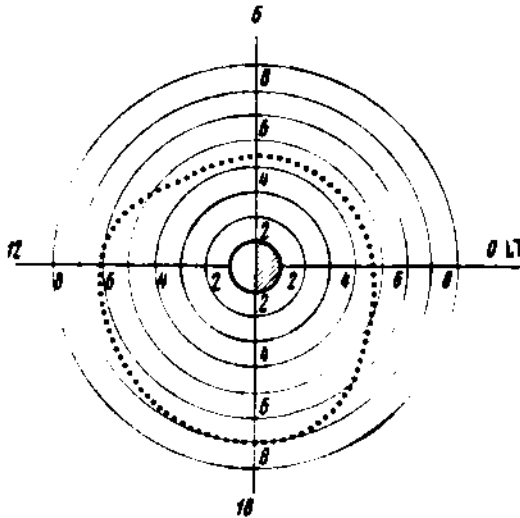
ной плазмопаузы, а  $L_m$  — полуденной. По данным спутников «Прогноз» и «Прогноз-2» для спокойных и умеренно магнитно-возмущенных условий средняя величина  $\Delta L_m = 1,6$ , а при сильных возмущениях может падать почти до нуля.

По данным тех же спутников при спокойных условиях асимметрия плазмосферы относительно меридиана 00 час. — 12 час. LT (в направлении утро — вечер) составляет в среднем  $\Delta L_m = 2,5$  (данных относительно  $\Delta L_m$  при возмущениях, полученных на этих спутниках, недостаточно для выводов).

Таким образом, описываемые измерения обнаружили асимметрию плазмопаузы в направлении полдень — полночь при магнитно-спокойных условиях, в среднем несколько меньшую, чем в направлении утро — вечер, однако все же весьма значительную; эта асимметрия уменьшается с ростом геомагнитной возмущенности.

На фиг. 8 приведен график  $L_p(LT)$ , соответствующий данным измерений на спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2», проведенных при  $K_p = 1 \div 2$ .

Обсуждение данных о форме плазмопаузы. Необходимо сравнить данные, полученные



Фиг. 8

со спутников серии «Прогноз», с ранее опубликованными.

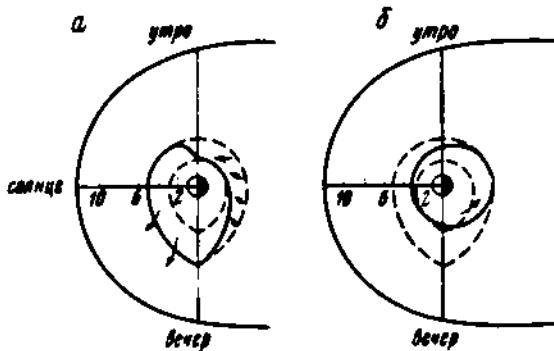
Различия высот плазмопаузы в полдень и в полночь не отмечены в результатах, полученных по наблюдениям свистящих атмосфериков [9, 53], и причины этого нуждаются в анализе; лишь в работе [56], опубликованной в 1976 г., отмечается, что в магнитно-спокойное время наблюдается дрейф плазмы поперек  $L$ -оболочек во внешней плазмосфере днем на больших экваториальных радиусах, чем ночью.

Особенности дневной плазмопаузы посвящена специальная работа Чэппела и др., основанная на результатах прямых измерений на спутнике ОГО-5 [51], а также часть обзора [52]; сравнение приведенных в этих статьях данных с описанными выше представляет наибольший интерес. Результаты, полученные на «Прогнозе» и «Прогнозе-2», подтверждают существование ряда особенностей дневной плазмопаузы, отмеченных в [51]. К ним относятся большая постепенность уменьшения  $n_i$  при увеличении  $L$ , чем на ночной стороне (одна из причин этого — известно, например, из [54] существование потоков плазмы из дневной ионосферы, поднимающихся вверх по магнитным силовым трубкам). В наших данных, как и в [51], в ряде случаев при  $L > 6$  наблюдается осциллирующий ход при спаде  $n_i$ , объясняемый в [51] процессами отделения холодной плазмы от дневной плазмосферы.

Из рассмотрения отдельных  $n_i(L)$ -профилей, приведенных в работах [25, 49—51], следует, что по данным этих профилей высота ( $L$ -координата) дневной плазмопаузы часто заметно превыпала высоту ночной плазмопаузы (см. фиг. 56, в [51], где левые графики соответствуют дневным часам, а правые — ночным; последнее не указано в [49], но следует из [25]). Однако, как уже отмечалось, на приведенной в [50] и [51] кри-

вой усредненных суточных изменений  $L$ -координаты плазмопаузы (воспроизводимой на фиг. 38) хотя и можно заметить некоторую асимметрию в направлении полдень — полночь, но она очень мала ( $\Delta L_{\text{ам}} < 0,5$ ) и авторы [49] не уделили ей внимания. По данным спутников «Прогноз» и «Прогноз-2» эта асимметрия, как видно из приведенных выше данных, значительно больше (во всяком случае для магнитно-спокойных условий).

Рассматриваемый эффект мог быть не замечен авторами [25, 49–51], если значительную часть периода измерений на ОГО-5, данные которых были использованы для построения «средней» плазмопаузы, занимали



Фиг. 9

геомагнитные возмущения, во время которых полуденно-полуночная асимметрия плазмопаузы уменьшается (следует иметь в виду, что 1968–1969 гг., к которым, по-видимому, относятся данные [25, 49–51], были годами максимума солнечной активности).

В обзоре [52], посвященном морфологии и динамике плазмосферы по данным прямых измерений, в разделе, относящемся к крупномасштабным «впадинам» концентрации заряженных частиц в  $n_p(L)$ -профилях, Чэппел привел две возможные схемы изменений размеров плазмосферы и ее формы при изменяющейся геомагнитной активности, включающих образования асимметрии в направлении полдень — полночь. Эти схемы воспроизведены на фиг. 9;  $a$  — уменьшение ночной плазмосферы — соответствует росту геомагнитной активности ( $\Delta L_{\text{ам}} > 0$ ),  $b$  — увеличение ночной плазмосферы — убыванию активности ( $\Delta L_{\text{ам}} < 0$ ).

Результаты измерений на спутниках серии «Прогноз», приведенные выше, не согласуются со схемой фиг. 9. Наибольшие значения получены во время длительных магнитно-спокойных периодов, когда суммы  $K_p$ -индексов за сутки, предшествующие измерениям ( $\Sigma K_p$ ), и за сутки после измерений ( $\Sigma K_p$ ), мало отличались друг от друга и были малы по величине (см., например, 24. VIII, 28. VIII, 7. X 1972 г., фиг. 5б, з, е).

Таким образом, «дневная выпуклость» плазмосферы является особенностью спокойной магнитосферы, а не возмущенной. В каком соотношении находится этот вывод с теорией плазмопаузы? Общепринятой теории пока нет. Существуют различные подходы к рассмотрению процесса формирования плазмопаузы.

Согласно одному из них, связанному с работами Нишиды [13], Брайса [14], Каванаха и др. [15], Распопова [18], форма плазмопаузы определяется в результате суперпозиции двух электрических полей (или, что то же, — двух течений плазмы), созданного конвекцией малоэнергичной плазмы во внутренней магнитосфере и созданного совместным вращением

околоземной плазмы с Землей. Этот подход привлекателен тем, что он дает простое объяснение вечерней выпуклости плазмопаузы, размеры плазмосферы, близкие к наблюдаемым; дневную выпуклость объяснить таким образом нельзя. Однако еще в 1968 г. Аксфорд отмечал, что этот подход чрезмерно упрощен [24]. Блок [55] считает, что совпадение с данными наблюдений в этом случае чисто случайное, так как принцип суперпозиция неприменим, ибо уравнения, описывающие поток плазмы, существенно нелинейны.

Карлсон [16], Блок [12], Самохин [17] учитывали эффекты, создаваемые пространственными зарядами, возникающими при инжекции горячей плазмы, способными «экранировать» плазмопаузу от внешнего электрического поля, и рассчитывали размеры зоны, образуемой вблизи земного магнитного диполя, запрещенной для конвекции. В последние годы Вулф с соавторами опубликовали результаты ряда последовательно усложняемых машинных вычислений самосогласованных электрических полей в магнитосфере, меняющихся во времени и учитывающих как асимметрию ионосферных проводимостей, так и инжекцию горячей плазмы из хвоста магнитосферы [57–59]. Из этих расчетов следует, что электрическое поле в магнитосфере вблизи местного полудня меньше, чем вблизи полуночи, т. е. днем конвекция плазмы замедлена и плазмопауза более удалена от Земли, чем ночью. К сожалению, из этих расчетов на данном этапе не следует постоянное существование вечерней выпуклости плазмопаузы.

Лемэр [60] предложил учитывать при рассмотрении процесса формирования плазмопаузы действие на ионы гравитационной силы и центробежной силы (возникающей благодаря вращению ионов вместе с Землей).

Таким образом, в настоящее время работы над проблемой магнитосферной конвекции, одной из составных частей которой является проблема формирования плазмопаузы, ведутся в различных направлениях. От результатов этих работ следует ожидать удовлетворительных объяснений как вечерней выпуклости, так и полуденно-полуночной асимметрии плазмопаузы в спокойных условиях.

Следует отметить, что обе асимметрии присущи эквипотенциалам в эмпирической модели магнитосферного электрического поля ЕЗН, созданной Мак-Илвейном с учетом данных наблюдений заряженных частиц на спутнике АТС-5 при  $K_p = 1-2$  [61]. Из всех ранее опубликованных моделей магнитосферного электрического поля (хотя последняя замкнутая эквипотенциаль в модели ЕЗН расположена слишком далеко от Земли) эта модель наиболее близко соответствует форме плазмопаузы при  $K_p < 2$  (фиг. 8). Сочетая эту модель с теоретическими представлениями [61] и используя зависящий от геомагнитной активности переменный масштабный коэффициент для электрического поля, Лемэр [62] создал модель плазмопаузы, обладающую дневной выпуклостью в спокойных условиях; однако в этой модели вечерняя выпуклость возрастает с ростом геомагнитной возмущенности.

В заключение отметим, что полуденно-полуночная асимметрия плазмопаузы является вполне естественной с точки зрения существующих представлений о магнитосферно-ионосферных связях, ибо (а) сама магнитосфера асимметрична и конвекция малоэнергичной плазмы вблизи подсолнечной части магнитопаузы значительно отличается от конвекции в ночной части магнитосферы, что должно отражаться и на форме эквипотенциальной поверхности, (б) более высокая проводимость дневной ионосферы, на которую опираются магнитосферные силовые трубки, производит закорачивающее действие, уменьшающее разность потенциалов

поперек экваториальной плоскости магнитосферы, уменьшающее скорость конвекции плазмы и поперечное электрическое поле по сравнению с ночной частью магнитосферы, в которой силовые трубки опираются на ночную ионосферу с низкой проводимостью. Большое электрическое поле на ночной стороне должно приближать эквипотенциаль-плазмопаузу к Земле. (в). Через силовые трубки, опирающиеся на дневную ионосферу, поднимаются потоки протонов, заполняющие плазмосферу, а через ночные силовые трубки идут вниз потоки протонов плазмосферы в ночную область  $F$  ионосферы. Это замедляет убывание  $n$ , вблизи плазмопаузы на дневной стороне и ускоряет его на ночной стороне плазмосферы.

### 3. Тепловая структура плазмосферы

Экспериментальные данные. Знание пространственных распределений температур электронов и протонов в плазмосфере весьма важно для локализации источников тепла в этой области, при исследовании процессов заполнения плазмой внешних силовых трубок и их опустошения и т. д. Измерения температуры заряженных частиц в плазмосфере крайне малочисленны и выполнены до настоящего времени всего двумя научными группами — одной в СССР, в которую входят авторы настоящего обзора, и другой — в США (Сербу и Майер). После первой оценки порядка величины  $T_e$  ( $\sim 10\,000^\circ$ ), сделанной в 1960 г. по данным измерений на космическом аппарате «Луна-2» [1], были проведены измерения на спутнике ИМП-2 (1966 г. [63]), результаты которых вызвали некоторые сомнения [21]. В 1967 г. были оценены  $T_e$  в плазмосфере по данным спутника «Электрон-2» [21, 64].

Последние и наиболее полные из известных нам американских данных о  $T_e$  в плазмосфере были опубликованы Сербу и Майером в 1970 г. по результатам измерений, проведенных методом тормозящих потенциалов на спутнике ОГО-5 в области, близкой к экваториальной плоскости (наклонение орбиты ОГО-5, к экватору  $\sim 30^\circ$ ) [65].

Согласно [65] величина  $T_e$  с ростом геоцентрического расстояния  $R$  (которое в случае ОГО-5 весьма близко к  $L$ -координате Мак-Илвейна) увеличивается постепенно при  $\Sigma K, < 11$ , где  $\Sigma K$ , — сумма  $K_p$ -индексов за сутки, или осциллирует при  $19 < \Sigma K, < 27$  от величины порядка нескольких тысяч  $^\circ\text{K}$  при  $K_p = 2$  до  $T_e > 10^4$   $^\circ\text{K}$  при  $K_p = 4-3,5$ ; авторы [65] наблюдали также резкое (скачкообразное) повышение  $T_e$  вблизи плазмопаузы при  $\Sigma K, = 15$ . Вследствие специфики орбиты спутников серии «Прогноз» каждый спутник пересекает за один оборот вокруг Земли определенную  $L$ -оболочку на различных высотах (см. фиг. 2 и раздел 1); это позволило определять некоторые особенности пространственного распределения  $T_e$  и  $n$ , как вблизи экваториальной плоскости, так и вдали от нее.

На спутнике «Прогноз» определение  $T_e$  велось при помощи двух ионных ловушек с нулевыми потенциалами на внешних сетках с различными углами атаки ионного потока методом, описанным в разделе 1. В [45] были приведены предварительные результаты определений  $T_e$  при некоторых оборотах спутника, а в [46] — уточненные результаты, воспроизводимые ниже.

На фиг. 10 слева представлены результаты определения  $T_e$  (сплошная линия) и  $n$  (пунктир) в дневной части плазмосферы при четырех последовательных прохождении «Прогноза» около Земли в мае 1972 г., а на фиг. 11 — трех пролетов того же спутника в июне 1972 г. В отличие от фиг. 4-7, по оси абсцисс в линейном масштабе отложены  $L$ -координаты, а не высоты (которые также указаны). Это облегчает сравнение величин  $T_e$  и  $n$ , на различных высотах, но внутри одного и того же и-

тервала близких  $L$ -оболочек. Интервалы между каждой парой графиков на фиг. 10 и 11 равны четырем суткам — периоду оборотов спутника вокруг Земли. Правые части фиг. 10 и 11 иллюстрируют движение спутника через  $L$ -оболочки и относительно плоскости геомагнитного экватора (изображена условная меридиональная плоскость, в которой параметрам реального движения соответствуют величины и углы между направлением от центра Земли к спутнику и экваториальной плоскостью). На фиг. 10, 11 справа указаны также  $K_p$ -индекс в момент начала измерений в плазмосфере,  $K_{pm}$  — максимальный  $K_p$ -индекс за предшествующие сутки,  $(\Sigma K_p)_1$  — сумма  $K_p$ -индексов за предшествующие сутки и  $(\Sigma K_p)_2$  — сумма  $K_p$ -индексов за последующие сутки.

Из фиг. 10 и 11 видно, что  $T_i$  зависит в основном не от высоты (монотонно возрастающей вдоль оси абсцисс), а от координаты  $L$ .

Вблизи  $L_{min}$  во всех случаях (независимо от степени геомагнитной возмущенности)  $T_i < 8 \cdot 10^4$  °К. Назовем условно внутреннюю зону плазмосферы с  $T_i < 8 \cdot 10^4$  °К «холодной», а внешнюю с  $T_i > 8 \cdot 10^4$  °К — «горячей». Заштрихованные области  $L$ -оболочек на фиг. 10 и 11 соответствуют внешней, горячей зоне.

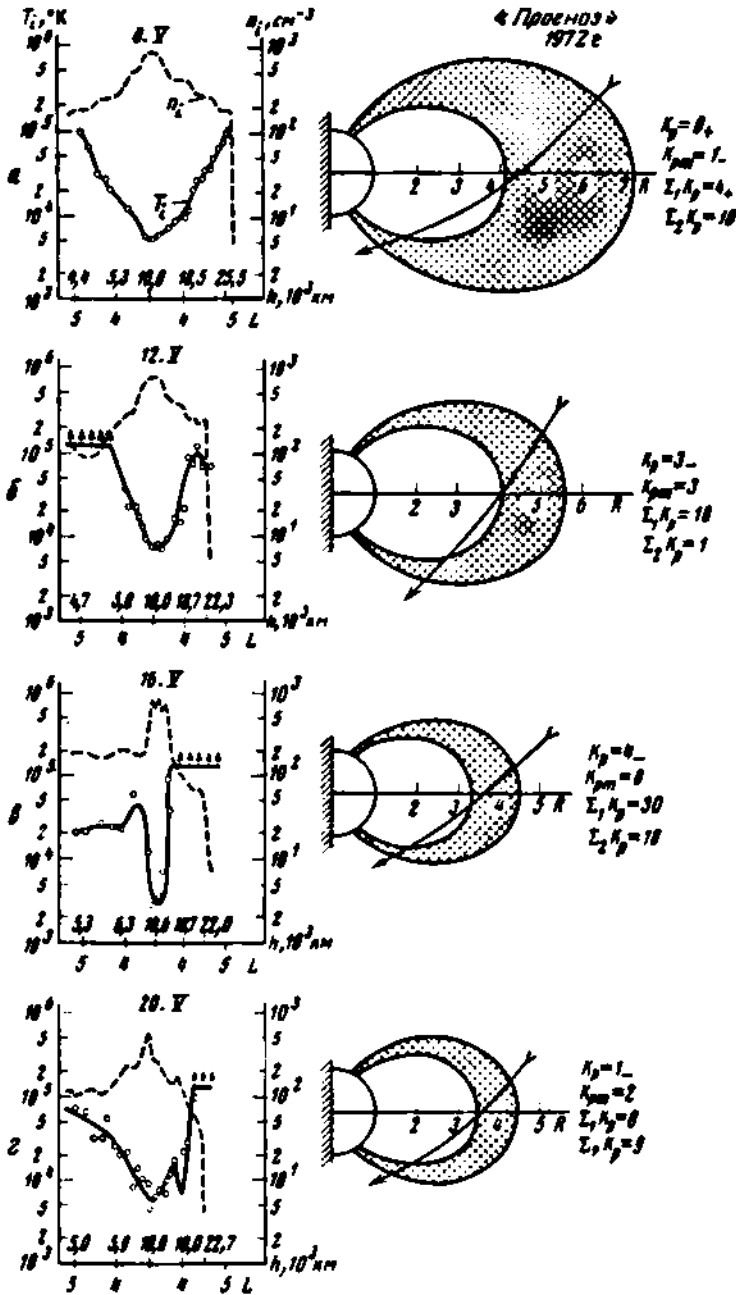
Фиг. 10а построена по данным 8.V 1972 г. после продолжительного весьма спокойного периода ( $K_{pm} = 1$ ) перед началом слабого геомагнитного возмущения; фиг. 10б — во время слабого возмущения ( $K_{pm} = 3$ ); 15.V началась сильная геомагнитная буря — фиг. 10в относится к 16.V, когда буря начала ослабевать ( $K_{pm} = 8$ ); фиг. 10г относится к 20.V — к фазе восстановления.

Наряду с изменениями размеров плазмосферы, связанных с опустошением внешних силовых трубок во время геомагнитной бури и их последующим весьма медленным заполнением ( $L$ -координаты плазмопаузы 16 и 20.V одинаковы, хотя возмущения прекратились), можно видеть, как менялась в зависимости от геомагнитной активности и ее предьстории тепловая структура плазмосферы. В частности, 16.V (и 17.VI, фиг. 10а) во время сильных геомагнитных бурь нарастание  $T_i$  у границы холодной зоны происходит весьма резко, скачком; 20.V в фазе восстановления происходит охлаждение внутренней части горячей зоны (хотя размеры холодной и горячей зон еще не изменились);  $T_i$  при увеличении  $L$  за границей холодной зоны увеличивается постепенно. Процесс постепенного расширения холодной и горячей зон и охлаждения внутренней части горячей зоны после сильной геомагнитной бури виден на фиг. 10е и 10с (24.VI и 25.VI 1972 г.). Вблизи плазмопаузы  $T_i$  во всех приведенных случаях близка к  $10^4$  °К. В магнитно-спокойных условиях кривые  $T_i$  и  $L$  квазисимметричны относительно  $L$  (фиг. 9а, 10е), при возмущениях эта симметрия нарушается.

Обсуждение результатов температурных измерений. Сравнение  $T_i(L)$ -данных, полученных на «Прогнозе» при умеренных и низких геомагнитных широтах (т. е. на больших высотах, например,  $H > 10^4$  км), с распределениями  $T_i(L)$ , полученными на спутнике ОГО-5 вблизи экваториальной плоскости, показывает, что хотя между данными  $T_i(L)$  с «Прогноза» и с ОГО-5 есть очевидные различия, они не очень велики.

Так, в «холодной» зоне, где плазма сохраняется даже во время сильных геомагнитных возмущений, по данным «Прогноза» всегда  $T < 10^4$  °К, тогда как по данным ОГО-5 она нередко достигает нескольких единиц на  $10^4$  °К. Так как данные ОГО-5 относятся к периоду, близкому к максимальной солнечной активности (1968 г.), а «Прогноза» — к периоду, близкому к минимуму (1972 г.), то возможно, что различие данных связано с зависимостью  $T_i$  в плазмосфере от солнечной активности. Измерения на «Прогнозе» подтвердили существование глубоких осцилляций  $T_i$  при  $L > 3$



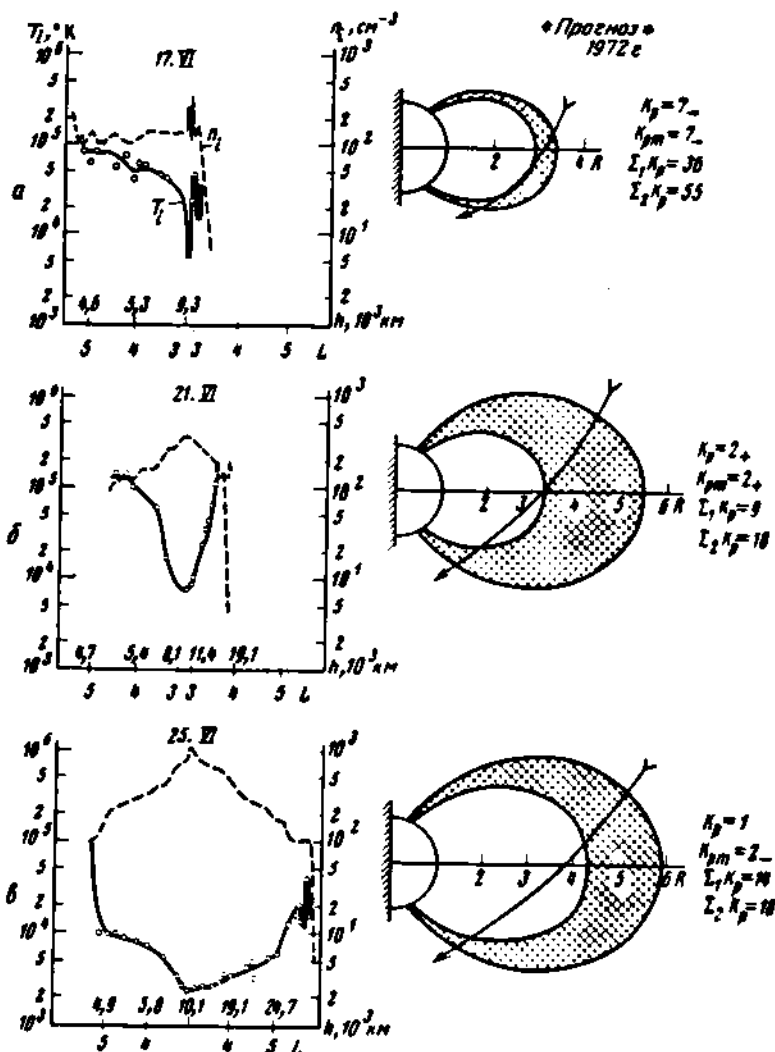


Фиг. 10

и при  $(\Sigma K_p)_1 > 19$  (см. фиг. 4в и 3а) в повышения  $T_e$  до величины  $\sim 10^6$  °K, которые отмечены Сербу и Майером в [85].

Для суждений о тепловом равновесии ионов или диффузионном равновесии внутри спловой трубки нужны, разумеется, одновременные измерения  $T_e$  и  $n_e$  в разных сечениях данной трубки. Тем не менее с точностью до долготных вариаций плазмосферы и учитывая сравнительно малое время пребывания спутника «Прогноз» в плазмосфере (в дневной ее

части — 1,5–2,5 час), некоторые суждения об этом возможны и по данным измерений, выполненных «Прогнозом» при каждом прохождении его около Земли на одной и той же  $L$ -оболочке, но на различных высотах  $H$ ; равенство  $T_i$  служит признаком постоянства  $T_i$  в разных сечениях силовых трубок. В этом случае графики  $T_i(L)$  на фиг. 9 и 10 должны быть



Фиг. 11

симметричны относительно  $L$ . При  $L > 3$  при диффузионном равновесии  $n_i \sim \text{const}$  примерно на  $1/2$  длины силовой трубки, начиная от экватора [66], поэтому симметрия графика  $n_i$  относительно  $L_{\text{min}}$  может свидетельствовать о диффузионном равновесии вдоль трубки.

Из фиг. 10 и 11 видно, что условия диффузионного равновесия и теплового равновесия ионов совпадают (см. 10а и 10б). Во время и вскоре после геомагнитных бурь величины как  $T_i$ , так и  $n_i$  при данных  $L$ , но различных  $H$  могут быть существенно отличны друг от друга (см. фиг. 10с, 10г, 10а, 11с). Детальный анализ таких данных (еще не про-

веденный) может привести к локализации источников нагрева ионов внутри плазмосферных силовых трубок в различных геомагнитных условиях.

Было высказано предположение, что высокие значения  $T_i$  вблизи плазмопаузы объясняются временным захватом в магнитную ловушку ионов с энергиями  $E > 5$  эв, принадлежащих к хвосту максвелловского распределения ионосферных ионов, что и создает высокую эффективную температуру ионов [65]. Этот механизм, по-видимому, не объясняет динамику горячей зоны плазмосферы и появление в ряде случаев разрыва непрерывности в  $T_i(L)$  (резкой границы горячей зоны).

Возможным источником нагрева плазмы в горячей зоне плазмосферы является взаимодействие протонов кольцевого тока и холодной плазмосферной плазмы в процессе вторжения в плазмосферу частиц кольцевого тока в фазе развития геомагнитной бури или расширения плазмосферы в фазе восстановления, приводящие к ионно-циклотронным колебаниям в плазмосфере. В результате затухания Ландау этих колебаний на электронах происходит разогрев плазмосферных электронов (как это предположили Корнуэлл и др. [29]), а вследствие индуцированного рассеяния ионно-циклотронных колебаний на ионах — разогрев ионов, причем ионы могут разогреться сильнее, чем электроны, согласно выводу Галеева [67]. Прямые измерения электронной температуры в горячей зоне плазмосферы пока не осуществлены; измерения  $T_i$  удовлетворительно согласуются с теоретической оценкой [67].

Поведение протонов кольцевого тока при взаимодействии с плазмосферой детально изучено при помощи спутника «Эксплорер-45» (см., например, [68]) и свидетельствует об образовании ионно-циклотронных колебаний в зоне взаимодействия. Таким образом, и экспериментальные данные, и теоретические оценки, имеющиеся в настоящее время, позволяют полагать, что источником разогрева внешней части плазмосферы может быть взаимодействие частиц кольцевого тока с холодной плазмой, окружающей Землю. При этом можно было бы объяснить и влияние геомагнитных возмущений на горячую зону, и появление резкой границы между горячей и холодной зонами. Однако измерения  $T_i$  на «Прогнозе» проводились только в дневной части плазмосферы, а инжекция частиц кольцевого тока происходит из магнитосферного хвоста, т. е. из ночной части магнитосферы, и кольцевой ток проявляется вблизи полуденной части плазмосферы (становится симметричным) только во время сильных геомагнитных возмущений. Вместе с тем, как показали измерения, горячая зона в дневной плазмосфере существует всегда, и поэтому ее существование в магнитно-спокойные периоды все еще нуждается в объяснении.

#### 4. Заключение

В сделанном выше обзоре сведений о плазмосфере Земли основное внимание уделено результатам, полученным в последние годы со спутников «Прогноз», относящимся к форме плазмопаузы в экваториальной плоскости и к распределению ионной температуры в плазмосфере. Однако при помощи одного спутника Земли или даже нескольких одновременно находящихся в магнитосфере спутников нельзя получить исчерпывающих сведений о форме плазмопаузы (так как спутники одновременно пересекают плазмопаузу в лучшем случае в небольшом числе точек). Наземные наблюдения свистящих атмосферников, несмотря на отмеченную выше их ограниченность (невозможность получения данных о локальной концентрации заряженных вне плоскости геомагнитного эк-

ватора и получения информации о температуре частиц, трудности получения дневных данных), сыграли и будут продолжать играть важную роль в исследованиях плазмосферы (особенно ночной), так как они позволяют получать статистически богатые данные с хорошим временным разрешением и притом недорогими средствами. В частности, заслуживают внимания сведения о значительных неоднородностях плазмосферы, полученные Карпентером и Парком по данным свистящих атмосферных [53].

«Дневная выпуклость» плазмосферы в спокойных геомагнитных условиях, как следует из данных фиг. 4, 5, является ее устойчивой особенностью, и, с нашей точки зрения, любая новая теория формирования плазмосферы должна объяснять и эту ее особенность.

В результате исследований, проведенных на спутниках «Прогноз», можно также считать установленным существование холодной ( $T_e \leq 8000^\circ$ ) и достаточно стабильной внутренней зоны ( $L \leq 3,5$ ) плазмосферы и «горячей» внешней зоны, размеры, форма и распределение  $T_e$ , которой сильнее всего меняются при магнитосферных бурях и суббурях. При длительных магнитно-спокойных периодах плазма внутри геомагнитных силовых трубок внешней зоны находится в диффузионном равновесии, которое (как и тепловое равновесие) нарушается в периоды возмущений; величина  $T_e$  на плазмосфере достигает  $10^5$  °К.

Широкий круг вопросов, относящихся к наблюдательным данным и физике процессов, связанных с плазмосферой и плазмосферой (в частности, с взаимодействием волн и частиц в области плазмосферы и к связи плазмосферы со «среднеширотным ионосферным провалом»), не нашел отражения в настоящем обзоре. Мы отсылаем читателя к материалам симпозиумов, опубликованным в [34, 35].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский. Докл. АН СССР, 1960, 131, 1301.
2. К. И. Грингауз, В. Г. Курт, В. И. Мороз, И. С. Шкловский. Докл. АН СССР, 1960, 132, 1062.
3. К. И. Грингауз. Space Research II, North-Holland, 1962, 539.
4. D. L. Carpenter. Progress in Radio Sci., 1960-1963, vol. III, Elsevier, Amsterdam - London - New York, 1965.
5. R. A. Helliwell. Solar-terrestrial physics. 1970. Reidel, Dordrecht - Holland, 1972, 165.
6. В. В. Безруких, К. И. Грингауз. Исследования космического пространства. «Наука», 1965, 177.
7. В. В. Безруких. Космические исследования, 1970, 8, 271.
8. H. A. Taylor Jr., H. C. Brinton, C. R. Smith. J. Geophys. Res., 1965, 70, 5769.
9. D. L. Carpenter. J. Geophys. Res., 1966, 71, 693.
10. W. I. Axford, C. O. Hines. Canad. J. Phys., 1961, 39, 1433.
11. W. B. Hanson, J. B. Ortneberger, J. Geophys. Res., 1961, 66, 1425.
12. L. Block. J. Geophys. Res., 1966, 71, 855.
13. A. Nishida. J. Geophys. Res., 1966, 71, 5669.
14. N. Brice. J. Geophys. Res., 1967, 72, 5193.
15. L. D. Kavanagh, J. W. Freeman, A. J. Chen. J. Geophys. Res., 1968, 73, 5511.
16. E. T. Karlson. Phys. Fluids, 1963, 6, 706.
17. М. В. Самохин. Космические исследования, 1967, 5, 376.
18. О. М. Распопов. Солнечно-земная физика, 1. Изд. Совета Солнце - Земля, М., 240.
19. J. H. Binzack. J. Geophys. Res., 1967, 72, 5231.
20. D. L. Carpenter, C. G. Park, H. J. Taylor Jr., H. C. Brinton. J. Geophys. Res., 1969, 74, 1837.
21. В. В. Безруких, Т. Н. Бреус, К. И. Грингауз. Космические исследования, 1967, 5, 798.
22. H. A. Taylor Jr., H. C. Brinton, M. W. Pharo. J. Geophys. Res., 1968, 73, 961.
23. К. И. Грингауз. Rev. Geophys. Space Phys., 1969, 7, 339.
24. W. I. Axford. Rev. Geophys. Space Phys., 1969, 7, 421.
25. C. R. Chappel, K. K. Harris, G. W. Sharp. J. Geophys. Res., 1970, 75, 50.

26. B. A. Tverskoy, *Solar-terrestrial Physics*, 1970, p. III. Reidel, Dordrecht, 1972, 297.
27. В. А. Трощная, А. В. Гульельми. Успехи физ. наук, 1969, 97, 453.
28. В. Ю. Трахтенгерц. Сб. «Ионосферные исследования». № 22, 1975, 12.
29. J. W. Cornwall, F. V. Coroniti, R. M. Thorne. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, 4428.
30. D. J. Williams, T. A. Fritz, A. Konrady. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, 4751.
31. S. E. De Forest. *J. Geophys. Res.*, 1972, 77, 651.
32. A. Rosen. *Physics of solar planetary environments*, v. II, ed. D. J. Williams. Amer. Geophys. Union, 1976, 1024.
33. A. F. Nagy, R. G. Robble, P. B. Hays. *Space Sci. Rev.*, 1970, 11, 709.
34. *Ann. géophys.*, 1975, T. 31, Fasc. 1.
35. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1976, 38.
36. E. C. Whipple, L. W. Parker. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 2062.
37. E. C. Whipple, L. W. Parker. *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, 5763.
38. L. W. Parker, E. C. Whipple. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 4720.
39. E. C. Whipple. Report to Commission on magnetosphere of URSI. Warsaw, 1972.
40. E. C. Whipple, J. M. Wornock, R. H. Winckler. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79, 179.
41. H. C. Brinton, R. A. Pickett, H. A. Taylor Jr. *Planet. Space Sci.*, 1968, 16, 849.
42. K. K. Harris, G. W. Sharp, C. R. Chappel. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 219.
43. В. В. Безруких, А. П. Беляшви, Г. И. Волков и др. Геомагнетизм и аэрономия, 1974, 14, 399.
44. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, 38, 1071.
45. V. V. Bezrukikh, K. I. Gringauz. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, 38, 1091.
46. K. I. Gringauz. *Physics of solar planetary environments*, ed. D. J. Williams. Amer. Geophys. Union, 1976, 672.
47. D. L. Carpenter. *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, 2969.
48. M. J. Rycroft, Y. O. Thomas. *Planet. Space Sci.*, 1970, 18, 65.
49. C. R. Chappel, K. K. Harris, G. W. Sharp. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 219.
50. C. R. Chappel, K. K. Harris, G. W. Sharp. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 348.
51. C. R. Chappel, K. K. Harris, G. W. Sharp. *J. Geophys. Res.*, 1971, 76, 3832.
52. C. R. Chappel. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1972, 7, 951.
53. D. L. Carpenter, C. G. Park. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1973, 11, 133.
54. C. G. Park. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 4249.
55. Л. Блок. Космическая геофизика (под ред. А. Энеанде, О. Холтера и А. Омхольта). «Мир», 1976, 152.
56. D. L. Carpenter, N. T. Seely. *J. Geophys. Res.*, 1976, 81, 2728.
57. R. K. Jaggy, R. A. Wolf. *J. Geophys. Res.*, 1973, 78, 2852.
58. R. A. Wolf. In: *Magnetospheric phys.*, ed. by B. M. McCormac, Reidel, Dordrecht, 1974, 167.
59. M. Harel, R. A. Wolf. In: *Physics of solar environments*, v. II, ed. by D. J. Williams, 1976. Amer. Geophys. Union, 617.
60. J. Lemeire. *Ann. géophys.*, 1975, 31, Fasc. 1, 175.
61. C. E. McIlwain. In: *Magnetospheric physics*, ed. B. M. McCormac, Reidel, Dordrecht, 1974, 143.
62. J. Lemeire. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, 38, 1041.
63. G. P. Serbu, E. J. R. Maier. *J. Geophys. Res.*, 1967, 71, 3755.
64. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Брейс. Космические исследования, 1967, 5, 245.
65. G. P. Serbu, E. J. R. Maier. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75, 6103.
66. Angerami, Thomas. *J. Geophys. Res.*, 1969, 69, 4537.
67. A. A. Galeev. In: *Physics of the hot plasma in the magnetosphere*, ed. B. K. Hultqvist and L. Stenflo, 1975. Plenum Press, New York — London, 251.
68. D. J. Williams, L. R. Lyons. *J. Geophys. Res.*, 1974, 79, 4195.