

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**ПРОБЛЕМЫ  
СОЛНЕЧНОЙ  
АКТИВНОСТИ  
И КОСМИЧЕСКАЯ  
СИСТЕМА  
«ПРОГНОЗ»**



---

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» МОСКВА 1977

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАГНИТОСФЕРОЙ ЗЕМЛИ

Т. К. Бреус, К. И. Грингауз

## I. ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Начиная с 1961 г., когда на спутнике «Эксплорер-12» впервые была зарегистрирована отчетливая граница магнитосферы Земли, более чем в двух десятках экспериментов исследовались свойства плазмы, магнитного поля и энергичных частиц, создан ряд моделей, описывающих форму и положение структурных особенностей магнитосферы — магнитопаузы, плазмопаузы и т. д.

В настоящее время вполне очевидно, что грубые аспекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли можно рассматривать в рамках обычной магнитной гидродинамики.

Гидродинамические расчеты положения и формы дневной магнитопаузы, выполненные в ряде работ [1, 2], дали хорошее соответствие с экспериментальными результатами и подтвердили реальность модели солнечного ветра как сплошной среды. Однако образование геомагнитного хвоста, простирающегося до  $1000 R_E$ , процесс проникновения солнечной плазмы в магнитосферу, динамика магнитосферы остаются до сих пор в значительной степени неопределенными.

Данжи в 1961 г. [3] предположил, что основную роль в формировании и динамике магнитосферы играет пересоединение межпланетного и геомагнитного полей в присутствии южной компоненты межпланетного поля ( $B_s$ ), перпендикулярной к плоскости эклиптики, причем пересоединение означает существование нормальной к магнитопаузе компоненты межпланетного поля.

Анализ экспериментальных данных, полученных на спутнике «Эксплорер-12» [4, 5], показал, что только треть пересечений магнитопаузы спутником удавалось интерпретировать как вращательный разрыв с компо-

нентой  $B_{ZMF}$ , нормальной к магнитопаузе. Остальные пересечения оказались тангенциальными разрывами. Имеются данные, полученные на спутнике ATS-1 [6], когда во время сильной бури в присутствии большой южной компоненты  $B_s$  магнитопауза отождествлялась с тангенциальным, а не с вращательным разрывом.

Таким образом, хотя и нельзя отрицать возможности пересоединения, предположенного Данжи, и его роли в динамике магнитосферы, пока трудно согласиться с тем, что пересоединение — единственный механизм передачи тангенциального напряжения от солнечного ветра к магнитосфере, тем более, что этот механизм не может объяснить стабильное существование геомагнитного хвоста в периоды, когда в межпланетном магнитном поле существует северная компонента.

Другой механизм передачи импульса от солнечного ветра магнитосфере — «вязкоподобное» взаимодействие — был предложен Аксфордом и Хайнсом [7] и Паркером [8, 9]. Согласно этим авторам, граница магнитосферы неустойчива к тангенциальному разрыву и поэтому может происходить перемешивание магнитного поля с плазмой, торможение солнечного ветра и диффузия геомагнитного поля через магнитопаузу.

В работе [10], например, в рамках магнитной гидродинамики, рассчитывалось взаимодействие солнечного ветра с магнитным полем Земли, сопровождающееся образованием пограничного слоя из-за неустойчивости границы магнитосферы.

Развивающиеся на границе неустойчивости должны приводить к возникновению аномального сопротивления и магнитогидродинамического пограничного слоя с некоторой магнитной вязкостью. Авторы не приводят оценок толщины пограничного слоя. Однако ясно, что его толщина должна быть порядка толщины скинслоя

$$\delta = \sqrt{tc^2/4\pi\sigma_{эфф}},$$

где  $t = L/v$  — характерное время процесса;  $\sigma_{эфф}$  — аномальная проводимость;  $c$  — скорость света.

Для  $L = 10^{10}$  см — размер магнитосферы,  $v = 5 \times 10^7$  см/с и  $\sigma_{эфф} = 2 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup> [11], толщина пограничного слоя оказывается всего лишь порядка  $\sim 100$  км.

Таким образом, можно сказать, что как в соответствии с экспериментальными результатами, относящимися

к прошлому десятилетию, так и согласно теоретическим моделям магнитопауза представлялась как предельный случай тангенциального разрыва, по одну сторону от которого — в солнечном ветре — давление плазмы превосходит магнитное ( $B^2/8\pi \ll P$ ), а по другую сторону — в магнитосфере — плазма отсутствует ( $B^2/8\pi \gg P$ ).

Однако в 1967—1976 г. в ряде плазменных экспериментов было обнаружено, что при переходе через границу магнитосферы, регистрируемую по резкому изменению направления магнитного поля, не наблюдалось резких изменений свойств плазмы: величина концентрации и температура либо оставались такими же, как в переходной области на расстояниях иногда более чем  $2R_E$ , либо плавно уменьшались в глубь магнитосферы. Это означало, что плотность энергии магнитного поля преобладает над энергией плазмы как внутри границы, так и вне ее, и противоречило классическим представлениям о границе магнитосферы.

Первые сведения о диффузной плазменной структуре магнитопаузы были получены в удаленных областях хвоста магнитосферы.

Аппарат «Пионер-8» впервые пересек диффузную магнитопаузу на расстоянии  $\sim 40 R_E$  в хвосте [12]. На спутниках Вела на расстояниях  $\sim 18 R_E$  была исследована морфология диффузной границы и обнаружено, что магнитопауза имеет толщину  $\sim 3 R_E$  в области проекции каспов на хвост магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля, причем толщина ее уменьшается на флангах с приближением к экваториальной плоскости. Авторы этих экспериментов назвали обнаруженное ими явление пограничным слоем [13, 17]. На европейском высокоапогейном спутнике ГЕОС-2 [15, 16, 19] это явление наблюдалось вблизи Земли на высоких широтах в хвосте магнитосферы над каспом и в каспе.

Авторы назвали его плазменной мантией, считая, что оно охватывает хвост магнитосферы, начиная от каспов.

На советских спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2» [17, 18] из-за особенностей эксперимента магнитопауза могла наблюдаться как на высоких, так и на низких эклиптических широтах вблизи полуденного меридиана. Было обнаружено, что в 40—50% случаев дневная магнитопауза имеет диффузный характер. Позднее, когда

эволюция орбиты ГЕОС-2 позволила исследовать на этом спутнике дневную магнитопаузу на широтах более  $30^\circ$ , авторы экспериментов на ГЕОС-2 также сообщили, что в шести случаях они регистрировали диффузную магнитопаузу на дневной стороне. В работе [31] область магнитопаузы на широтах от  $30^\circ$  до каспа названа «входным слоем».

На спутнике «Эксплорер-35» [20] пограничный слой, или диффузная граница был обнаружен вблизи орбиты Луны на расстояниях  $\sim 60 R_E$ . Свойства диффузной границы на таких больших удалениях в хвосте подробно исследованы с помощью плазменных детекторов, установленных на поверхности Луны во время миссий «Аполлона — 12, 14 и 15» [21].

Как уже отмечалось выше, обнаружение диффузной магнитопаузы имеет принципиальное значение для физики магнитосферы. Поскольку каспы считаются в настоящее время основным источником, поставляющим плазму солнечного ветра в магнитосферу Земли, то вопрос взаимосвязи каспа с дневной и ночной диффузной магнитопаузой представляет большой интерес для понимания природы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Ниже приводится обзор экспериментальных данных, относящихся к границе магнитосферы как на ночной, так и на дневной стороне, а также в районе каспа, полученных на спутниках «Прогноз», «Прогноз-2», ГЕОС-2 и на орбите Луны; рассматривается зависимость свойств плазменной структуры этой границы от свойств солнечного ветра, описаны предполагающиеся механизмы формирования обнаруженных в экспериментах особенностей структуры границы и отмечены те аспекты, которые требуют дальнейшего экспериментального изучения.

## II. ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ ИЛИ ПЛАЗМЕННАЯ МАНТИЯ

1. Общие характеристики диффузной границы в хвосте магнитосферы. Основные свойства пограничного слоя [13] (или мантии [15, 16, 19], или диффузной магнитопаузы [12, 17, 18]), как ее по-разному называли авторы этих экспериментов) сводятся к следующему.

1) В экспериментах, проводившихся на искусственных спутниках или на поверхности Луны, когда можно было получить статистические сведения об этой области, отмечалось, что примерно в 70% случаях граница магнитосферы по плазменным данным была не резкой, а наблюдалось постепенное изменение свойств переходного слоя, продолжавшееся иногда несколько часов и занимавшее по расстоянию от 0,5 до  $4R_E$ . По магнитным данным граница магнитосферы при этом регистрировалась как внезапное изменение направления вектора магнитного поля (на спутниках ГЕОС). На спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2» и по магнитным данным не удавалось обнаружить особенности, характеризующие резкий переход через магнитопаузу.

2) В пограничном слое наблюдалось постепенное уменьшение концентрации, скорости и температуры плазмы от границы магнитосферы, отмечаемой магнитометрами, на ГЕОС-2 и от спектров, типичных для переходного слоя на спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2», до внутреннего края слоя. Концентрация плазмы уменьшалась иногда в 5 и более раз, скорость и температура падали примерно в 2 раза.

На внутреннем крае слоя наблюдаемое распределение протонов по скоростям и углам часто было настолько узким, что отклики прибора регистрировались только в одном или двух энергетических интервалах. При этом отсчеты наблюдались при низких энергиях, т. е. потоки протонов становились холодными по сравнению с потоками переходного слоя перед тем, как переставали регистрироваться.

3) Направление движения плазмы в мантии было таким же, как в переходном слое, т. е. вдоль магнитного поля в хвосте от Солнца.

4) Скорость потока в мантии коррелировала со скоростью в переходном слое, но не изменялась с расстоянием от Земли, т. е. с удалением в хвост.

5) Иногда между магнитопаузой, регистрируемой магнитометрами, и плазменной мантией наблюдалась «щель» размером  $0,1-0,2R_E$ , т. е. в этой области происходило резкое уменьшение плотности и скорости протонов («щель» наблюдалась изредка только на ГЕОС-2).

6) В мантии наблюдалась анизотропия температуры:  $T_{\parallel}/T_{\perp} > 1$ , т. е. температура протонов, поперечная к

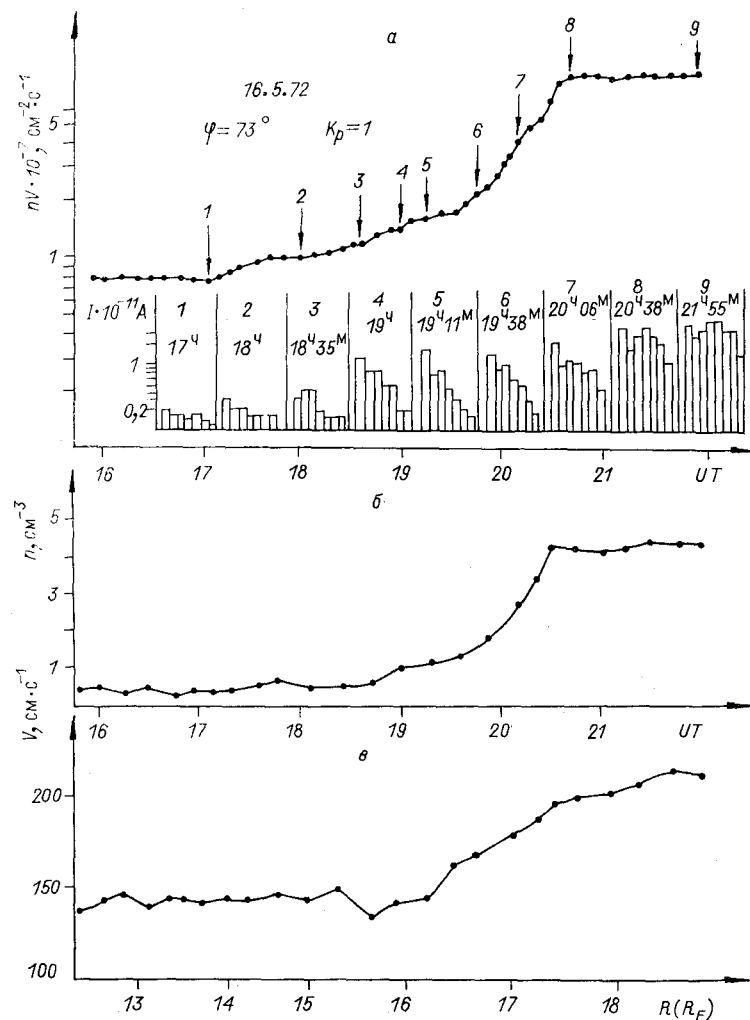


Рис. 1.

магнитному полю, оказывалась больше продольной.

7) Толщина мантии была изменчивой, но по совокупности данных всех экспериментов можно заключить, что вблизи каспов и на их проекции вдоль высоких широт в хвост мантия имеет максимальную толщину.

На утреннем и вечернем флангах магнитосферы, вблизи плоскости эклиптики (там, где возрастала толщина плазменного слоя в хвосте) мантия становилась тонкой или вообще не наблюдалась.

8) На расстояниях  $\sim 60R_E$ , т. е. у орбиты Луны, плазма с характерными свойствами мантии наблюдалась в области магнитосферы, которая являлась зазором между мантией и плазменным слоем на меньших расстояниях от Земли (например, на расстояниях  $\sim 18R_E$ ), т. е. плазма мантии опускалась и заполняла хвост магнитосферы, примыкая к плазменному слою.

9) Имелись случаи, когда в отсутствие мантии в хвосте на расстояниях  $\sim 3R_E$  от магнитопаузы регистрировались потоки малоэнергичной плазмы, текущие вдоль поля в хвост, т. е. как бы оторвавшаяся мантия.

10) Не обнаружена какая-либо зависимость свойств мантии от  $K_p$ -индекса магнитной активности.

11) Изучение зависимости толщины мантии от существования вертикальной компоненты магнитного поля показало, что мантия не наблюдается, если магнитное поле имеет северную компоненту, превышающую  $\sim 2\gamma$ . Толщина мантии растет с ростом величины южной компоненты межпланетного магнитного поля.

2. Экспериментальные данные, иллюстрирующие и подтверждающие перечисленные выше свойства мантии, приведены ниже.

На рис. 1 показана диффузная магнитопауза, зарегистрированная 16 мая 1972 г. на спутнике «Прогноз» с помощью модуляционной ловушки, измерявшей энергетический спектр протонов в диапазоне 0—4 кэВ, разбитом на 8 энергетических интервалов [17, 18]. На рисунке показаны спектры, характерные для области пролета спутником от переходной области (справа) к магнитосфере (слева). Верхняя кривая *a* характеризует плавное изменение величины потока ионов  $nV$ , а кривые *b* и *c* — изменения средней скорости и концентрации ионов в этой области, рассчитанные по формулам

$$n = \sum \frac{I_i}{V_i} 0,367 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$$

и

$$\bar{V} = \frac{\sum I_i}{\sum \frac{I_i}{V_i}} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1},$$

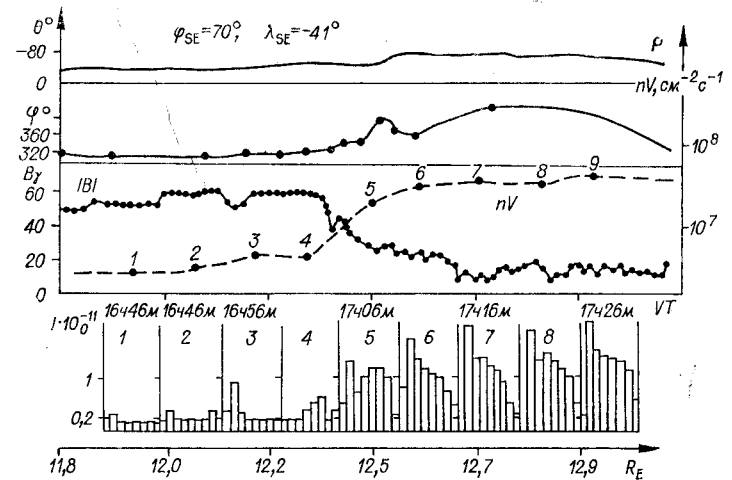


Рис. 2.

где  $I_i$  — значение коллекторного тока ловушки в  $i$ -й ступеньке.

Можно видеть, что происходит плавное помягчение спектров на расстоянии  $\sim 3R_E$  (относительное уменьшение токов в энергетических интервалах, соответствующих высоким энергиям). Широта наблюдения была  $\sim 49^\circ$ , долгота —  $56^\circ$  в солнечно-магнитосферной системе координат (GSM). Другой случай наблюдения диффузной границы на спутнике «Прогноз» (8 мая 1972 г.) показан на рис. 2, причем были сопоставлены данные одновременных измерений плазмы и магнитного поля. Очевидно, что постепенное помягчение спектров и уменьшение потока на расстоянии  $\sim 0,7R_E$  не сопровождается заметными существенными изменениями какой-либо из характеристик магнитного поля ( $B$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ).

На рис. 3 показан случай пересечения мантии спутником «Прогноз-3» (1973) [17, 18], на котором было установлено 5 идентичных модуляционных ионных ловушек. Это свидетельствует о том, что в мантии не происходит значительного отворота потока от антисолнечного направления. В самом деле, оси четырех ловушек образовывали угол  $\sim 30^\circ$  с осью центральной ловушки,

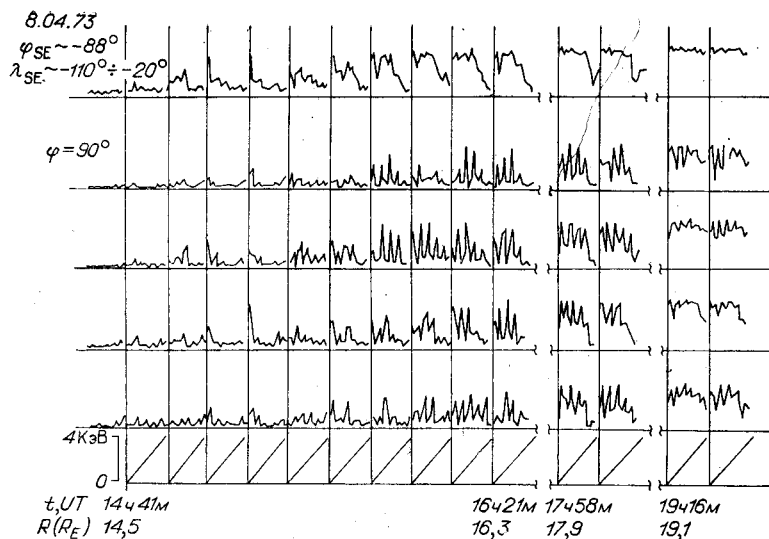


Рис. 3

ориентированной на Солнце (верхний график) и направленной вдоль оси вращения аппарата.

Если ионный поток отклоняется на угол  $\alpha$  от оси центральной ловушки, то в боковых ловушках наблюдается модуляция токов вращением спутника; при  $\alpha > 15^\circ$  максимальный поток может попасть в боковую ловушку. Как можно видеть из рисунка, в центральной ловушке во всех энергетических интервалах потоки превышали максимальные потоки в боковых ловушках, т. е. отклонение потока от антисолнечного направления в диффузной магнитопаузе не превышало  $15^\circ$ . (На нижнем графике схематически показано направление возрастания энергии при снятии спектра.)

На рис. 4 приводится пример наблюдения мантии на спутнике ГЕОС-2 [16, 19]. Орбиты спутника ГЕОС-2 в июне и декабре 1972 г. показаны на рис. 5 в солнечно-магнитосферной системе координат с условно отмеченной конфигурацией геомагнитного поля.

На ГЕОС-2 измерения проводились с помощью электростатических анализаторов в диапазоне энергий 100 эВ—40 кэВ. Измерялось угловое распределение и

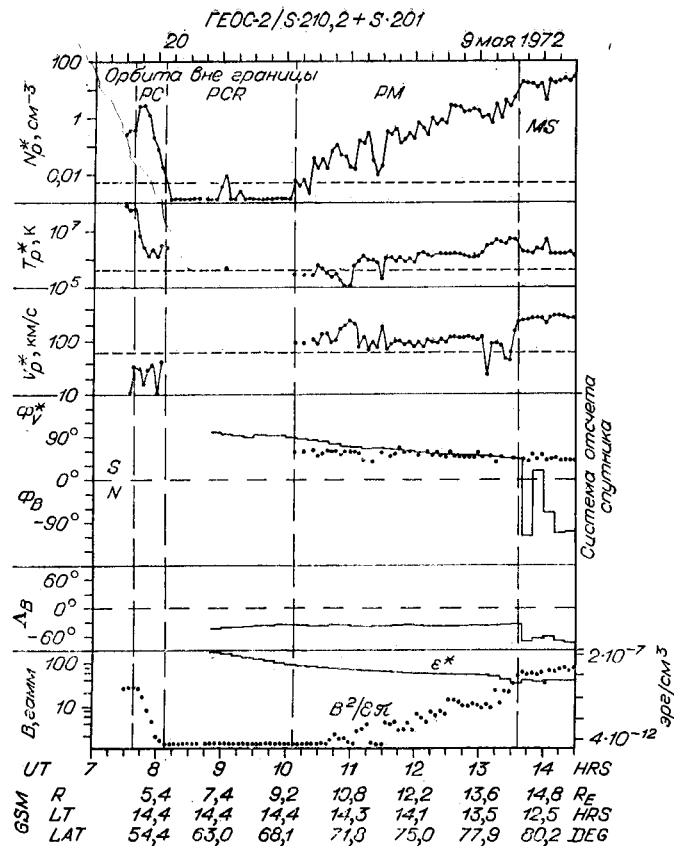


Рис. 4.

энергетический спектр протонов. Спутник вращался вокруг оси, перпендикулярной к линии Солнце—Земля и лежащей в плоскости эклиптики, так что экваториальная плоскость спутника совпадала с плоскостью меридиана полночь—полдень. Измерения прибора давали представление о функции распределения в этой плоскости.

Скорость  $V$  и поле  $B$  представляют собой проекции истинной скорости и магнитного поля на эту плоскость (см. рис. 4). Углы  $\Phi_B$  и  $\Phi_V$  указывают направления

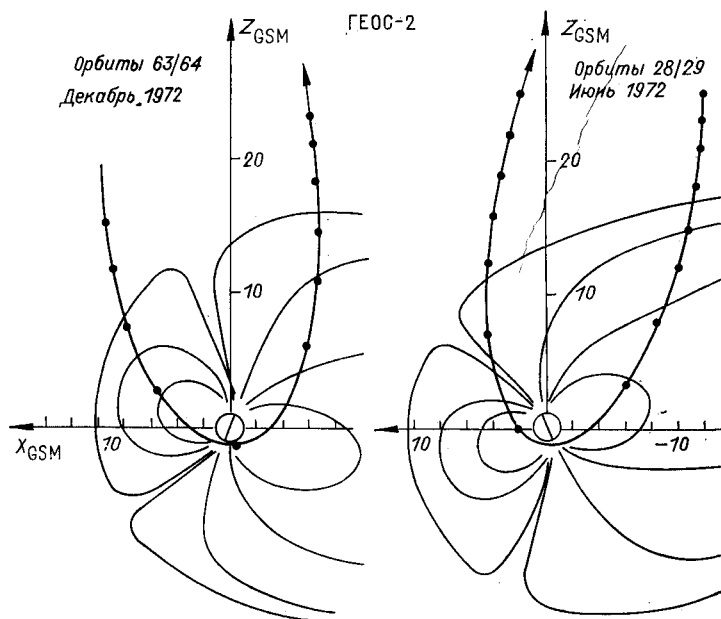


Рис. 5.

скорости и магнитного поля, отсчитываемые таким образом, что при  $\Phi_B = \Phi_V = 0$  скорость имеет антисолнечное направление, а магнитное поле направлено к Солнцу.  $\lambda_B$  — характеризует отклонение вектора магнитного поля от плоскости полуденного меридиана. На нижнем графике производится модуль магнитного поля, энергия поля  $B^2/8\pi$  и плотность полной энергии протонов  $\epsilon$ , вычисленная с полученной в эксперименте двумерной функцией распределения. Из рисунков 1, 3 и 4 видно, что свойства мантии по данным «Прогнозов» и ГЕОС-2 в основном совпадают. Направления движения плазмы в мантии — антисолнечное и вдоль поля. Вход в магнитосферу по данным ГЕОС-2 регистрируется как резкое изменение направления поля  $\Phi_B$ .

Следует отметить, что на внутреннем конце мантии возрастание плотности и уменьшение температуры, регистрируемые на «ГЕОС-2», по-видимому, не соответствуют реально существующим явлениям, а связаны с

погрешностями определения  $T_p$  по спектрам, содержащим, как и по данным «Прогноза» (см. рис. 1), отсчеты в одной или двух ступеньках.

На рис. 6, а изображены все случаи наблюдения мантии на ГЕОС-2 в плоскости полуденно-полуночного меридиана, а на рис. 6, б — в поперечном сечении хвоста магнитосферы на различных расстояниях от Земли [15]. Отрезками прямых линий на рис. 6, а показаны направления магнитного поля, т. е. направления движения плазмы в мантии. На рис. 7 представлена зависимость направленной скорости плазмы в мантии от значений скорости в переходном слое [19] (точками и треугольниками отмечены случаи регистрации мантии на восходящих и нисходящих участках орбит соответственно).

Очевидна тенденция к возрастанию скорости плазмы в мантии с ростом скорости плазмы в переходном слое.

На рис. 8 показан случай наблюдения «щели» между мантией и переходным слоем на ГЕОС-2. Отчетливо видно резкое уменьшение концентрации и скорости, одновременное с изменением направления магнитного поля, т. е. при входе спутника в магнитосферу, а затем наблюдается плазма, характерная для мантии [16, 19].

Как уже отмечалось и как видно из рис. 5, спутник ГЕОС-2 в начальные месяцы работы не мог регистрировать магнитопаузу на достаточно низких широтах в дневной магнитосфере.

В первых публикациях результатов [15, 16 и 19] авторы экспериментов отмечали, что при нескольких пересечениях дневной магнитосферы вблизи полуденного меридиана только в одном пересечении (широта  $40^\circ$ — $50^\circ$  GSM) наблюдалась мантия толщиной  $\sim 1R_E$  в сильно возмущенных геомагнитных условиях  $K_p \approx 4_+$  (наклон диполя при этом был равен  $\sim 30^\circ$ , зима). Поэтому авторы [15, 16, 19] пришли к выводу, что пограничный слой охватывает магнитосферу только в области каспов и на больших широтах, а дневная магнитопауза по плазменным данным представляется резкой. На рис. 9 показана предложенная ими в работах [15 и 16] модель магнитосферы с мантией, как они в соответствии с этой моделью называли диффузную магнитопаузу.

Орбиты спутников «Прогноз», запущенных на вечернюю сторону магнитосферы, за анализируемый период эволюционировали таким образом, что можно было на-

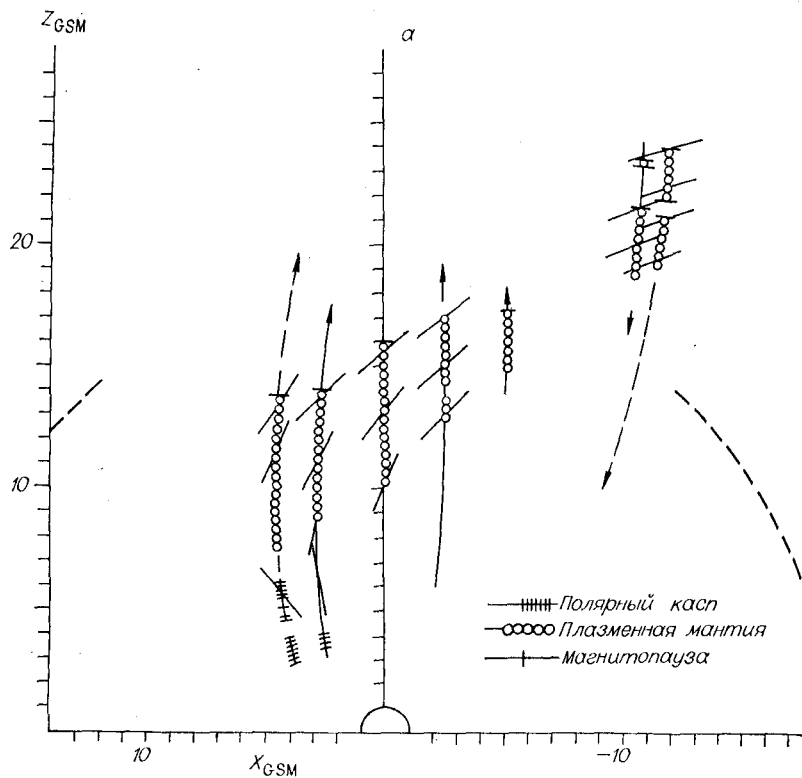
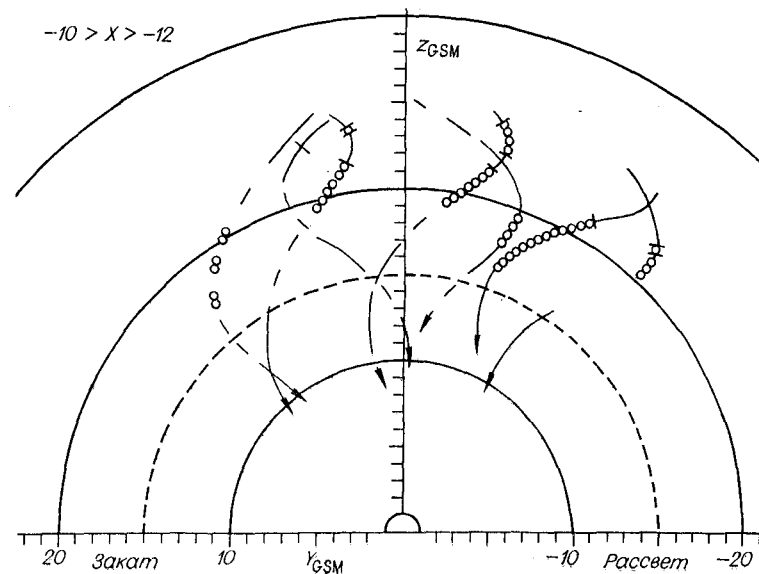
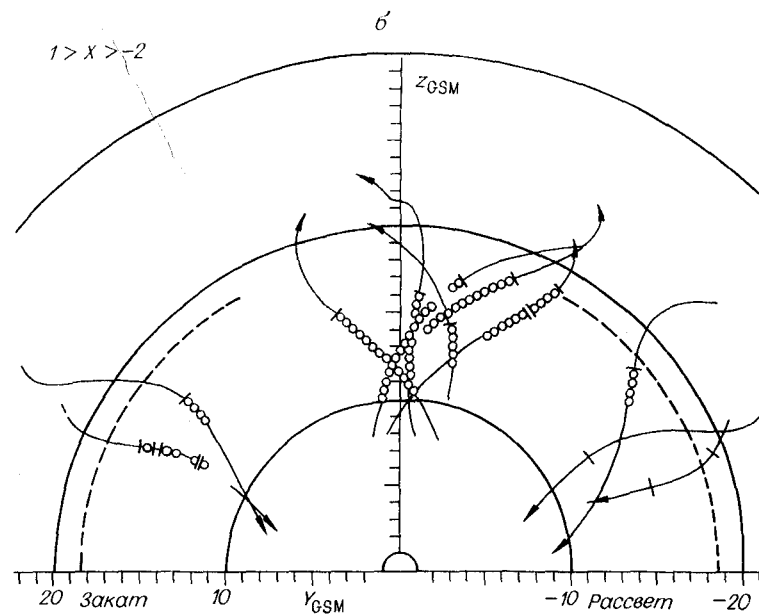


Рис. 6.

блюдать дневную магнитопаузу на низких солнечно-эклиптических широтах. На рис. 10 показаны все случаи наблюдения магнитопаузы на «Прогнозах». Сплошными отрезками показаны случаи пересечения диффузной магнитопаузы, штрихами и точками — многократные и однократные пересечения, сплошной кривой — среднее положение магнитопаузы, рассчитанное по всем пересечениям.

Результаты анализа широтного распределения наблюдений диффузной магнитопаузы на «Прогнозах» в [17 и 18] приведены ниже. Граница была аппроксимирована кривой второго порядка, симметричной относи-





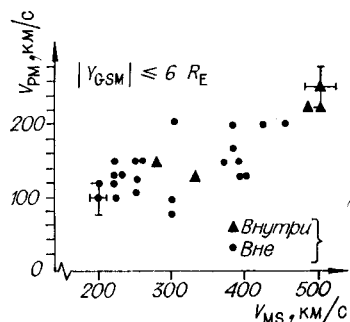


Рис. 7.

тельно  $X$ . Минимизировались среднеквадратичные расстояния вдоль нормали к границе.

Широта сол. экл., град	Резкая	Диффузн.	Всего	%
0—30	23	24	47	51
30—50	14	8	22	36*
50—70	7	17	24	70.

\* На спутнике «Прогноз-3» в области широт 30—60° из 19 наблюдений магнитопаузы в 16 случаях она была диффузной с  $\sigma \approx 0,9 R_E$ .

В области солнечно-эклиптических широт менее 50° на спутниках «Прогноз» в 40—50% случаев регистрировалась диффузная магнитопауза, причем многие из этих случаев наблюдались в области широт менее 30°.

Подробному анализу результатов, относящихся к дневной магнитопаузе, посвящен раздел III настоящего обзора. Отметим здесь, что авторы экспериментов на спутниках «Прогноз» в отличие от авторов экспериментов на ГЕОС-2 заключили в [17 и 18], что магнитопауза может быть диффузной как на ночной, так и на дневной стороне магнитосферы.

На Луне [21] (1975 г.) электростатические анализаторы (10 эВ—3,5 кэВ) регистрировали ионные спектры в период прохождения Луны через геомагнитный хвост, т. е. в течение 4—5 дней во время каждого прохождения (скорость движения Луны по орбите  $\sim 0,5R_E/4$ ). Поскольку плоскость орбиты Луны наклонена к эклиптической плоскости под углом 5°, в направлении оси  $Z$  наблюдения охватывали расстояния до 15—18 $R_E$  (рис. 11).

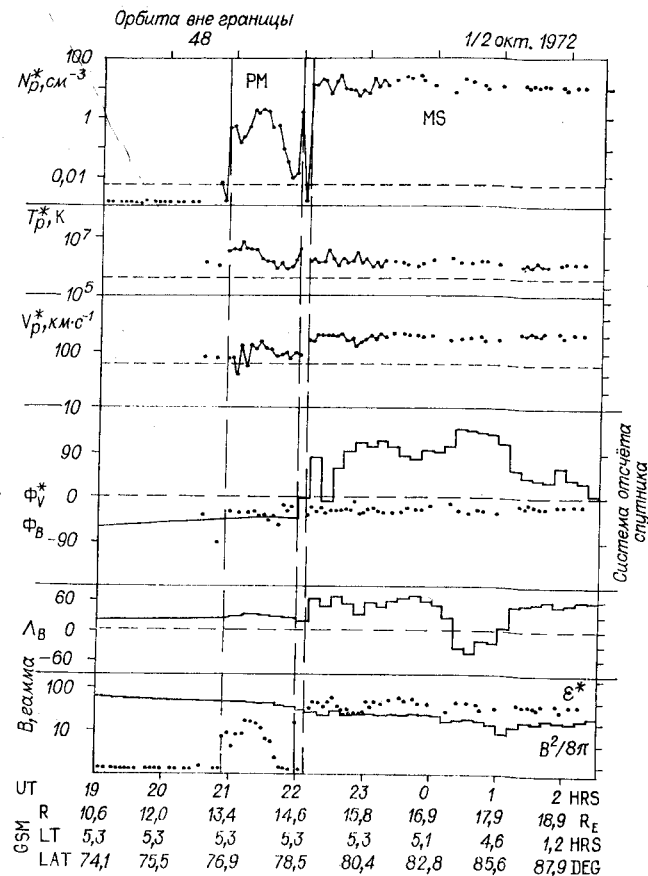


Рис. 8.

Были зарегистрированы прохождения плазменного слоя и прилегающей к нему области с плазмой, свойства которой напоминали свойства в мантии, а именно:  $n=0,1-3 \text{ см}^{-3}$ ,  $V=60 \div 150 \text{ км/с}$ , движение в направлении от Солнца,  $kT=2-80 \text{ эВ}$ . На рис. 12 показаны примеры спектров, относящихся к плазменному слою и к мантии в хвосте.

Мантия у орбиты Луны была названа авторами эксперимента «lobe»-плазма, поскольку она опускается к плазменному слою и заполняет, по-видимому, область

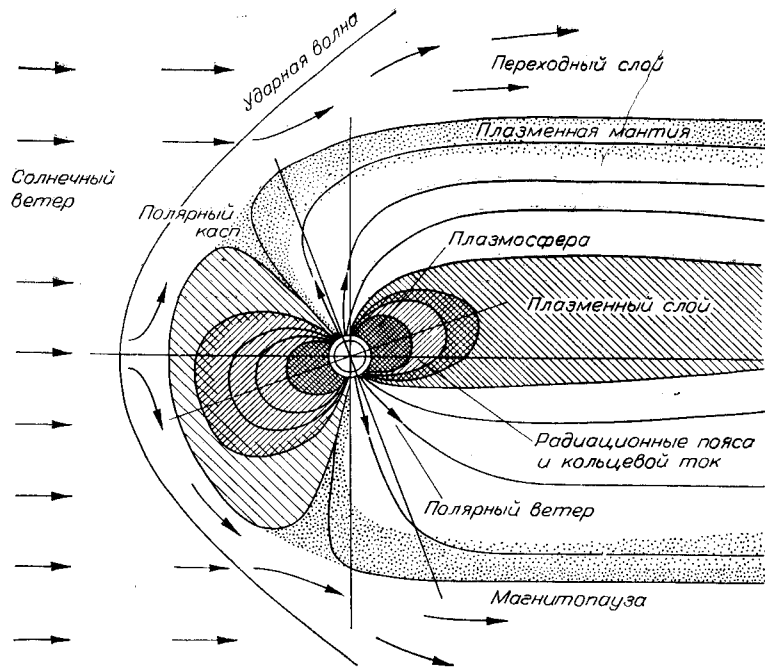


Рис. 9.

в магнитосфере, которая на меньших расстояниях от Земли была зазором между мантией и плазменным слоем и характеризовалась очень низкими ( $n < 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ ) концентрациями и энергиями частиц ( $\sim 100 \text{ эВ}$ ) [22]. Эта область называлась в прежних магнитосферных моделях *lobe*. «Lobe»-плазма настолько плотно примыкает к плазменному слою на орбите Луны, что часто наблюдались спектры, соответствующие перемешанной плазме (рис. 13), состоящей из двух потоков: с  $n = 0,1 \text{ см}^{-3}$ ,  $kT \sim 200 \text{ эВ/см}^3$  и  $V_B \approx 200 \text{ км/с}$  и высокоэнергичной плазмы плазменного слоя ( $V_B \approx 600 \text{ км/с}$ ,  $n = 0,01 \text{ см}^{-3}$  и  $kT = 100 \text{ эВ}$ ).

На рис. 14 схематически показана структура магнитосферы, предложенная в [21] с соответствующими названиями различных областей.

По данным, полученным на «Прогнозах» и ГЕОС-2 и на орбите Луны, исследовалась зависимость толщины

мантии от вертикальной ( $B_z$ ) и горизонтальной ( $B_r$ ) составляющей межпланетного магнитного поля.

Поскольку результаты этих исследований связаны с предположениями о причинах происхождения мантии, то они будут рассмотрены в следующем разделе.

**3. К вопросу о происхождении мантии.** Предполагались три возможных источника, питающих плазмой пограничный слой или мантию [17].

а) Одним из таких источников [16—19] может быть «полярный ветер» [23], т. е. ионосферная плазма, вытекающая вдоль силовых линий из полярных областей в высокоширотную магнитосферу. Однако типичные скорости полярного ветра  $\sim 10 \text{ км/с}$  и температура  $\sim 10^4 \text{ К}$ . Следовательно, необходим механизм, ускоряющий полярный ветер до  $100 \text{ км/с}$ ,  $T \sim 10^6 \text{ К}$ , локализованный в

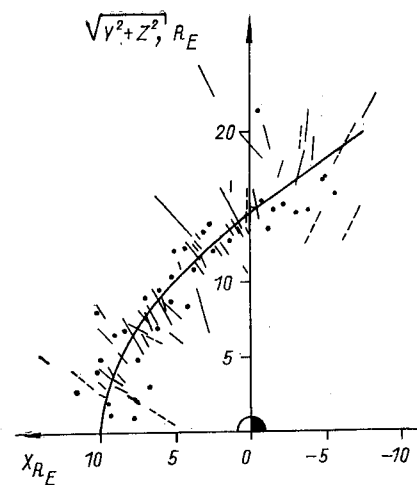


Рис. 10.

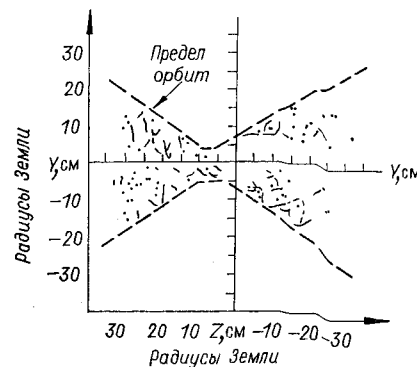


Рис. 11.

высоких широтах над полярной шапкой, связанный с условиями в солнечном ветре (чтобы объяснить корреляцию вариаций скоростей в мантии и переходной области).

Все это заставляет сомневаться в возможностях такого механизма как единственной причины образования мантии.

б) Диффузия плазмы переходного слоя

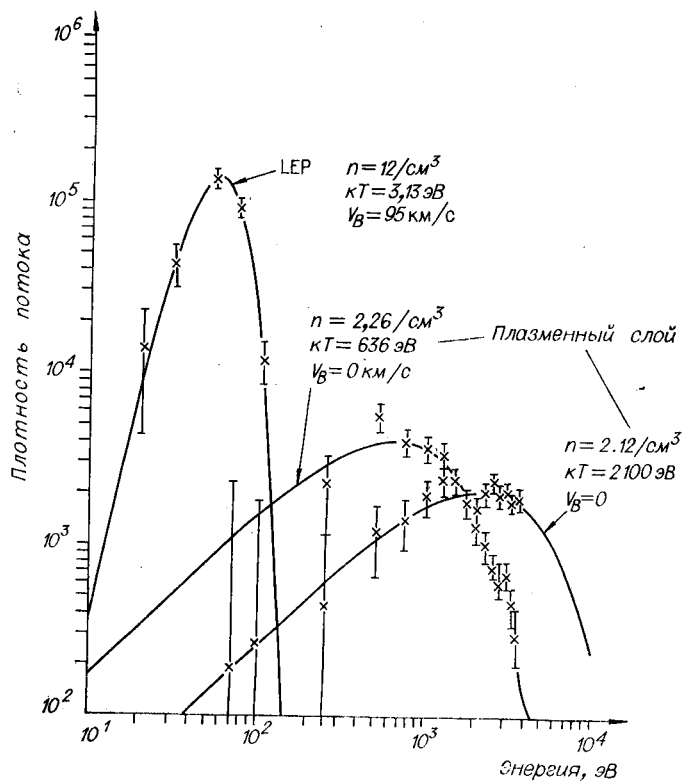


Рис. 12.

через магнитопаузу в магнитосферу [16, 17], обусловленная неустойчивостью магнитопаузы, как уже упоминалось во введении, может быть источником плазмы в мантии. С этой гипотезой хорошо согласуются такие свойства мантии, как направление скорости плазмы в мантии вдоль силовых линий в хвост (поскольку  $\beta$  мало), такое же как в переходном слое, а также уменьшение концентрации в глубь мантии. Трудно объяснить с точки зрения этого механизма резкое уменьшение концентрации или «щель» (см. рис. 8), иногда наблюдающуюся между мантией и магнитопаузой, а также уменьшение температуры с увеличением расстояния от магнитопаузы. Авторы экспериментов на «Прогнозах» [17, 18] пред-

полагали, что в области пересоединения межпланетного и геомагнитного полей на дневной стороне магнитосферы может происходить свободное втекание плазмы солнечного ветра в магнитосферу. Авторы экспериментов [16] предположили, что пересоединение, происходящее в области каспов, создает благоприятные условия для входа плазмы солнечного ветра в магнитосферу, и предложили следующее качественное описание образования мантии: сочетание двух

процессов — проникновения плазмы переходного слоя в дневной касп и одновременной конвекции этой плазмы в хвост магнитосферы под действием электрического поля создает то распределение свойств, которое наблюдается в мантии.

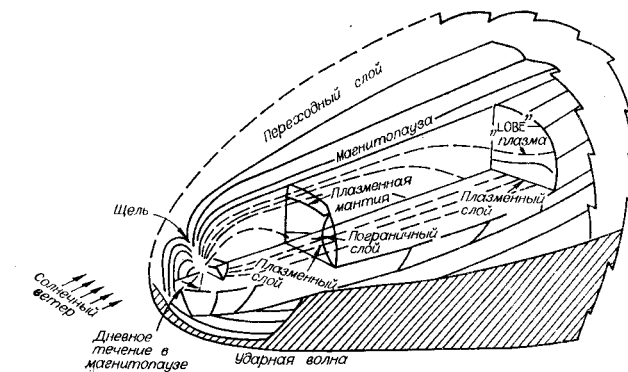


Рис. 14.

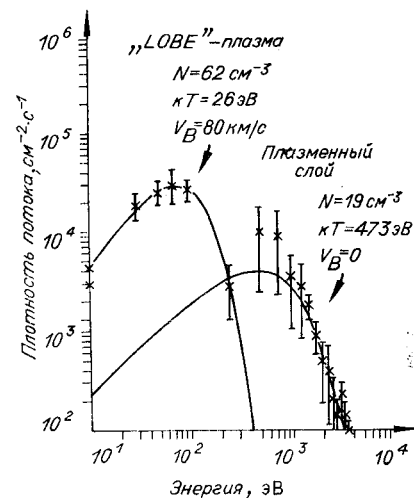


Рис. 13.

процессов — проникновения плазмы переходного слоя в дневной касп и одновременной конвекции этой плазмы в хвост магнитосферы под действием электрического поля создает то распределение свойств, которое наблюдается в мантии.

Рассмотрим подробнее предложенный в [16, 19] механизм образования мантии. В открытой модели маг-

нитосферы частицы, попавшие в касп из-за пересоединения межпланетного и геомагнитного полей, движутся в глубь каспа в возрастающем магнитном поле. Те частицы, которые не попадают в конус потерь, должны в таком случае отражаться из-за сохранения магнитного момента на некоторой высоте в каспе. В то же время в области каспов и полярных шапок существует электрическое поле, направленное с утренней стороны полярной шапки на вечернюю. Средняя величина его составляет, по данным экспериментов на спутниках и экспериментов с баллонами [24, 25],  $\sim 20$  мВ/м. Это поле будет вызывать конвекцию частиц в ночную сторону магнитосферы со скоростью

$$V_k = c[EB]/B^2.$$

Скорость конвекции не зависит от энергии частиц, но время, которое проводит частица в каспе, зависит от ее энергии и исходного питч-угла, поэтому электрическое поле будет воздействовать на частицы с различными питч-углами и энергиями различное время, тем самым создавая некоторое распределение точек отражения частиц поперек каспа. На рис. 15 схематически

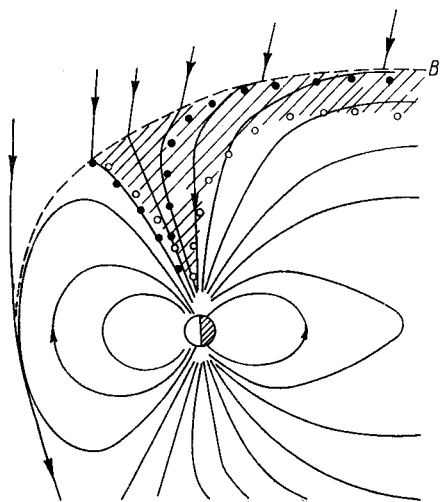


Рис. 15.

показана картина, поясняющая предполагающийся механизм формирования мантии. Быстрые частицы (имеющие большую среднюю энергию) проводят в каспе меньшее время, чем медленные, и их точки отражения не сильно смещены конвекцией к полярной границе каспа. Поэтому отраженные в хвост частицы более высоких энергий располагаются ближе к магнитопаузе (темные кружки на рис.

15) и создается распределение частиц в мантии с убывающей температурой в глубь мантии [16, 19].

Этот же механизм может объяснить убывание плотности с удалением от магнитопаузы в мантию: частицы с исходными малыми питч-углами проникают в касп глубже, дольше подвергаются действию  $E_k$ , смещаются ближе к полярной границе каспа и отражаются в область, лежащую ближе к внутренней границе мантии (светлые кружки на рис. 15). Поскольку частицы с малыми питч-углами немного, то концентрация должна падать к внутреннему краю мантии.

Это, разумеется, качественное описание механизма формирования мантии, которое требует теоретического и экспериментального обоснования.

Имеются некоторые косвенные экспериментальные результаты, согласующиеся с предложенным механизмом.

**4. Косвенные подтверждения механизма формирования мантии под действием конвекции.** В соответствии с рассмотренным выше механизмом, формирование мантии, уменьшение средней энергии протонов с удалением от магнитопаузы в глубь мантии должно быть отражением аналогичных вариаций спектров протонов в каспе с ростом широты только в измененном (уменьшенном) масштабе. В недавних экспериментах, проводившихся на спутниках, в каспе наблюдалась сходная с предполагаемой картины [26].

Наконец, если справедливо предположение, что пересоединение и конвекция участвуют в формировании мантии, то свойства плазмы в мантии должны зависеть от величины электрического поля конвекции и толщина мантии должна возрастать с возрастанием поля.

В самом деле, скорость конвекции плазмы в хвосте магнитосферы направлена внутрь хвоста (плазма совершает дрейф в скрещенных магнитном и электрическом полях, из которых первое направлено вдоль оси  $x$  (к Солнцу в северном полушарии), а последнее вдоль оси  $y$  с утра на вечер. Под действием конвекции плазма, переносимая в хвост вдоль  $\vec{B}$  ( $V_{||}$ ), из каспов будет дрейфовать в глубь магнитосферы со скоростью  $V_k(V_{\perp})$ , и толщина мантии будет определяться тем, насколько под влиянием конвекции успевает сместиться в глубь

магнитосферы плазма из каспов на заданном расстоянии в хвосте  $\Delta X$ , т. е. толщина мантии  $\sigma = \Delta X \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}$ .

Можно оценить примерную толщину мантии в хвосте на расстоянии, например,  $10 R_E$ , определив  $V_{\kappa}$  по данным об электрическом поле в полярных шапках. Среднее поле  $E_{\kappa}$  в области полярных шапок  $\sim 20$  мВ/м. Это поле проецируется в хвост магнитосферы вдоль магнитных силовых линий, которые можно считать эквипотенциалами, и, следовательно, средняя напряженность поля в хвосте должна быть во столько раз меньше напряженности поля в шапках, во сколько раз поперечные размеры хвоста больше поперечных размеров полярных шапок. Диаметр шапок  $\approx 0,5 R_E$  ( $30^\circ$  по широте), а диаметр хвоста  $\sim 40 R_E$ , т. е.  $E_{\kappa}$  в хвосте должно быть  $\sim$  в 100 раз меньше  $E_{\kappa}$  в шапках, т. е.  $\sim 0,2$  мВ/м.

В таком случае при среднем значении магнитного поля в хвосте  $\sim 20 \gamma$  скорость конвекции  $V_{\kappa}$  будет  $\sim 10$  км/с. Отсюда можно заключить, что течение плазмы в хвосте образует небольшой угол с направлением

магнитного поля  $\text{tg} \alpha = \frac{V_{\kappa}}{V_B} = \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} = 0,07, \alpha \leq 5^\circ$ , и толщина мантии на расстоянии  $10 R_E$  при скорости  $V_{\parallel}$  вдоль оси  $x$  порядка  $100 \div 200$  км/с должна быть  $\sim (0,5 \div 1) R_E$ .

Поскольку в открытой модели магнитосферы возрастание электрического поля конвекции связывается с появлением южной компоненты межпланетного магнитного поля  $B_s$ , то были сделаны попытки проверить выдвигавшиеся гипотезы с участием пересоединения путем сопоставления толщины мантии или диффузной границы со свойствами межпланетного магнитного поля.

Впервые свойства мантии были сопоставлены со свойствами межпланетного магнитного поля в работе [17] по плазменным данным, полученным на спутниках «Прогноз», и магнитным данным, полученным одновременно на европейском спутнике ГЕОС-1 [27] в свободном солнечном ветре. Было сопоставлено 30 случаев одновременных наблюдений диффузной границы и  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля и показано, что в присутствии южной компоненты магнитного поля  $B_s$  средняя толщина магнитопаузы, определяемая как расстояние от внутреннего ее конца (полной пропажи протонов) до внешнего края (спектров, характерных для

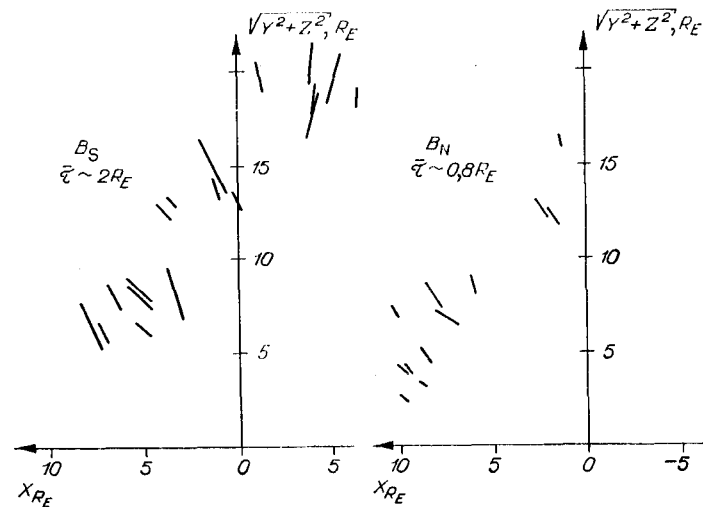


Рис. 16.

переходного слоя) была  $\sim 2R_E$ , т. е. намного превышала среднее значение  $\sim 0,8 R_E$  в присутствии северной компоненты межпланетного поля  $B_N$  (рис. 16).

В присутствии малой северной компоненты диффузная магнитопауза также наблюдалась, но с ростом  $B_N$  она пропадала, а все случаи наблюдения необычайно толстой границы  $\sigma \approx (3 \div 4) R_E$  соответствовали присутствию  $B_s$  (см. рис. 16).

По данным ГЕОС-2 недавно также была исследована толщина мантии в зависимости от существования южной компоненты  $B_s$  [28].

Для того, чтобы при сопоставлении толщин мантии, полученных в разных областях хвоста, и  $B_s$  учесть рост толщины мантии с удалением в хвост при заданном значении  $E_{\kappa}$  (анализировались только высокоширотные случаи наблюдения мантии), сравнивались приведенные толщины  $S_{\perp}$ , т. е. толщины, приведенные к некоторой средней величине магнитного поля и среднему положению в хвосте. Считалось, что хвост имеет форму цилиндра и толщина мантии определяется толщиной этого цилиндра (проекцией измеренной толщины мантии на торцевое сечение цилиндра в месте наблюдения).

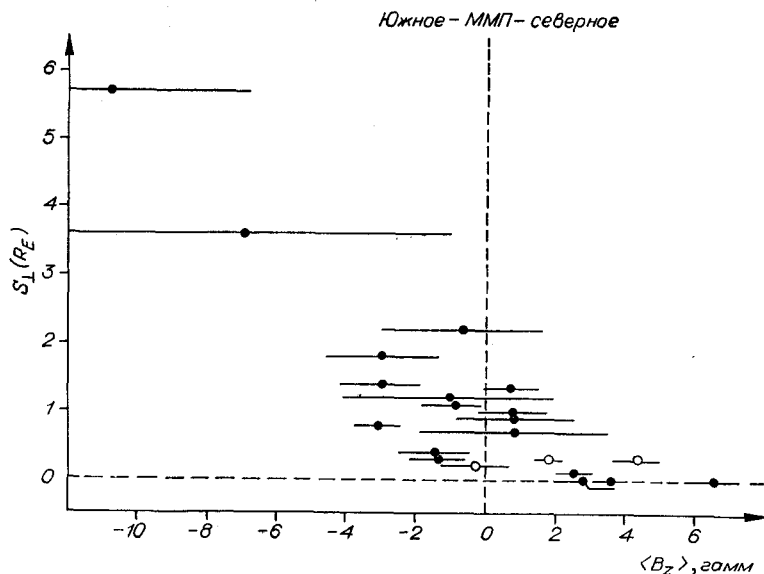


Рис. 17.

На рис. 17 показана зависимость  $S_{\perp}$  по данным ГЕОС-2 от  $B_z$  (по одновременным измерениям на спутнике «ИМП-6» с учетом временного запаздывания между спутниками).  $B_z$  усреднялись за время наблюдения мантии, когда она присутствовала, и за 1 ч пребывания спутника ГЕОС-2 вблизи магнитопаузы в магнитосфере, когда мантия не наблюдалась. Показана также среднеквадратичная ошибка в измерениях  $B_z$  на «ИМП-6». При  $B_N > 2 \gamma$  мантия не наблюдается; имеется тенденция к росту толщины мантии с ростом  $B_s$  — компоненты IMF (см. рис. 17).

Авторы [28] отмечают, что иногда в отсутствие мантии в хвосте наблюдается плазма вблизи магнитопаузы, не текущая в хвост, но обладающая большей энергией, чем плазма в переходной области ( $T \sim 10^7$  К, т. е., как в плазменном слое).

Поскольку это явление наблюдалось только при  $B_N$ -компоненте IMF, авторы [28] считают, что эта плазма может принадлежать плазменному слою и подтекать к магнитопаузе из-за изменения направления конвекции

в хвосте в присутствии  $B_N$ , если последняя существует длительное время (по результатам [25] электрические поля конвекции в полярных шапках в присутствии  $B_N$  имеют противоположное обычному направлению, и они могут вызывать конвекцию в направлении к Солнцу из глубины хвоста).

Наконец, интересные соображения относительно механизма образования «lobe»-плазмы под влиянием конвекции были высказаны в [21].

Если «lobe»-плазма представляет собой, как уже упоминалось в разделе II.2, плазму мантии, опустившуюся к эклиптической плоскости, т. е. на  $20 R_E$ , по мере того, как она движется к орбите Луны, проходя  $60 R_E$ , то можно оценить электрическое поле конвекции, являющееся предполагаемой причиной этого дрейфа.

При  $V_B = 6-150$  км/с,  $B = 15 \gamma$ , измеренных в области «lobe»-плазмы на Луне, и  $V_h = 1/3$ ,  $V_B = 20-150$  км/с, на расстояниях  $60 R_E$  поле конвекции  $E_h$  будет равно примерно  $0,3-0,8$  мВ/м, т. е. потенциал в магнитосфере и, следовательно, в области полярных шапок должен быть порядка  $100-200$  кВ.

Как известно, среднее значение потенциала в магнитосфере, получающееся по измерениям электрических полей над полярной шапкой,  $\sim 55$  кВ [25].

В действительности поле может быть неоднородным поперек хвоста магнитосферы. В [25 и 29] было показано, в частности, что электрическое поле полярных шапок имеет заметную асимметрию, зависящую от ориентации межпланетного магнитного поля. Из данных измерений на баллонах и на спутнике OGO-6 следует, что  $E_h$  больше с той стороны полярной шапки, где земное магнитное поле имеет компоненту, параллельную  $B_y$ -компоненте межпланетного магнитного поля.

Если конвекция усиливается с той стороны магнитосферы, где геомагнитное поле и  $B_y$  параллельны, то при отрицательной  $B_y$ -компоненте ( $B_y < 0$ ) конвекция и  $E_h$  должны быть усилены с вечерней стороны северного полушария (рис. 18, а) и утренней стороны южного полушария, а в случае положительной  $B_y$  — с утренней стороны северного полушария и вечерней стороны южного (см. рис. 18, а) [25].

Если эта гипотеза справедлива, то наблюдения «lobe»-плазмы в хвосте на орбите Луны, связанные с

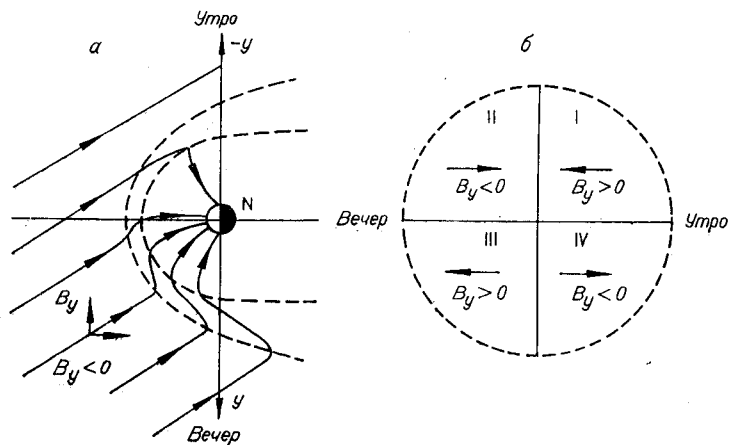


Рис. 18.

усилением электрического поля, опускающего мантию до плазменного слоя, должны отражать указанную зависимость от  $B_y$ .

В [21] было проведено следующее исследование.

Все области наблюдения лобе-плазмы (за 222 ч) были разделены на четыре квадранта, как показано на рис. 18, б, и проверялось, имела ли  $B_y$ -компонента нужное направление за каждый час наблюдений лобе-плазмы в каждом из этих квадрантов. Было построено долготное распределение  $B_y$ -компоненты IMF-поля во время наблюдений лобе-плазмы, когда датчики находились в квадрантах I, II, III и IV (рис. 19).

Из 177 рассмотренных случаев в 80% наблюдалась ожидаемая ориентация  $B_y$ -компоненты в соответствующих квадрантах, т. е. при регистрации «lobe»-плазмы в квадрантах I и III  $B_y$  была положительной (см. рис. 18 и 19), а в квадрантах II и IV — отрицательной, как и следовало из гипотезы пересоединения полей и связанного с ним усиления конвекции в магнитосфере.

Следует отметить, что в замкнутой модели магнитосферы с диффузией и с вязкого типа взаимодействием солнечного ветра и магнитосферной плазмы (предложенной Аксфордом и Хайнсом [9]) также могут работать рассмотренные выше механизмы конвекции и

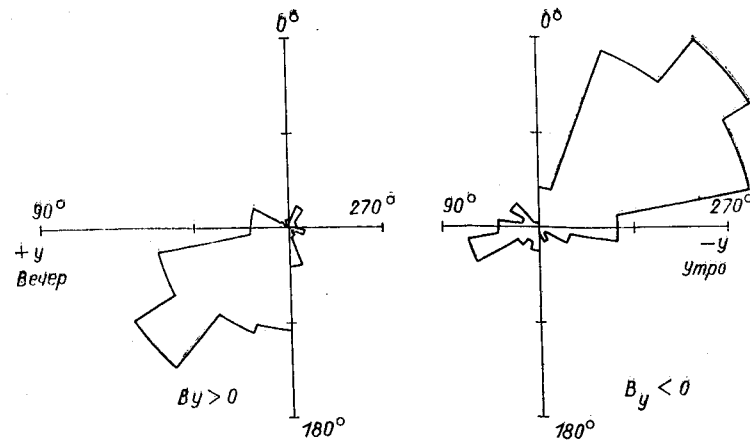


Рис. 19.

проникновения плазмы в магнитосферу вблизи нейтральных точек.

В [30] высказывалась гипотеза проникновения плазмы переходного слоя в магнитосферу в дневной подсолнечной области через «дыры» на магнитопаузе, образующиеся из-за неустойчивостей границы или пересоединения. Пузыри плазмы, попавшие в магнитосферу, затем должны конвектироваться вдоль ее границы в область каспов и далее в хвост вместе с силовыми линиями магнитного поля и могут питать плазмой мантию. Эта гипотеза опирается на экспериментальные данные, полученные на спутнике «Ореол-1». По этим данным на широте вблизи  $78^\circ$  наблюдаются высыпания протонов в виде пятен размером 200—500 км, которые можно интерпретировать как проекцию дневных «дыр» на магнитопаузу на область полярной ионосферы.

Все высказанные в различных работах гипотезы происхождения мантии, однако, остаются пока чисто качественными и требуют расчета и оценок.

В частности, в рамках гипотез пересоединения, проникновения через касп и через «дыры» в дневной магнитопаузе предстоит еще объяснить наличие большого количества плазмы в мантии, содержащейся в хвосте вплоть до орбиты Луны и заполняющей лобе-магнитосферы на больших удалениях в хвосте, если вспомнить,

что концентрация этой плазмы у орбиты Луны  $\sim (0,1 \div 3) \text{ см}^{-3}$ .

В открытой модели магнитосферы этот факт можно объяснить тем, что плазма может попадать в магнитосферу из переходного слоя не только через «дыры» на дневной стороне, но и через другие участки на протяжении всей магнитопаузы, где происходит пересоединение.

### III. ДНЕВНАЯ МАГНИТОПАУЗА

**1. Экспериментальные результаты.** Представляется довольно удивительным фактом, что за многие годы исследований дневной магнитосферы на спутниках, на которых имелись плазменные приборы, не было обнаружено (или во всяком случае не привлекло к себе внимания в тех отдельных случаях, когда регистрировалось) то явление, которое наблюдалось во время многих пересечений дневной магнитопаузы спутниками «Прогноз» [17] и в шести случаях ГЕОС-2 [31].

Как уже отмечалось, авторы экспериментов на Прогнозах назвали его «диффузной» магнитопаузой, а на ГЕОС-2 — «входным» слоем (entry layer).

На рис. 20 показаны примеры наблюдения дневной резкой и диффузной границы вблизи местного полудня

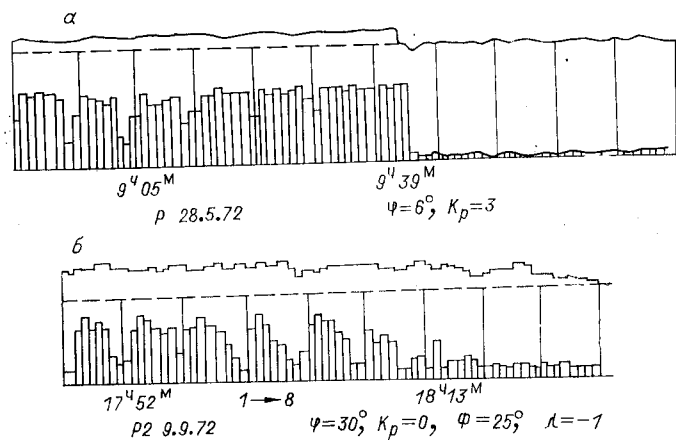


Рис. 20.

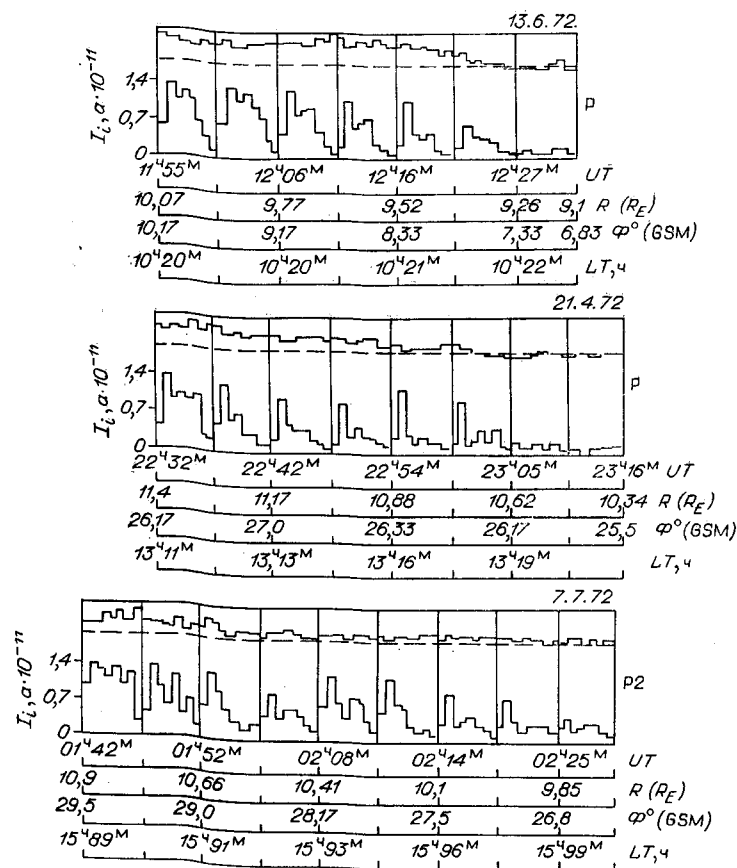


Рис. 21.

на низких широтах. Верхний график — показания интегральной ловушки. Измерения  $I_i$  в каждой энергетической ступеньке модуляционной ловушки и опрос интегральной ловушки проводились приблизительно раз в 40 с, а весь спектр модуляционной ловушки получался приблизительно за 5 мин. Данные интегральной ловушки привлекались для лучшего разрешения момента входа в магнитосферу.

В случае резкой границы магнитопауза пересекалась аппаратом примерно за 40 с (рис. 20, а). В случае,



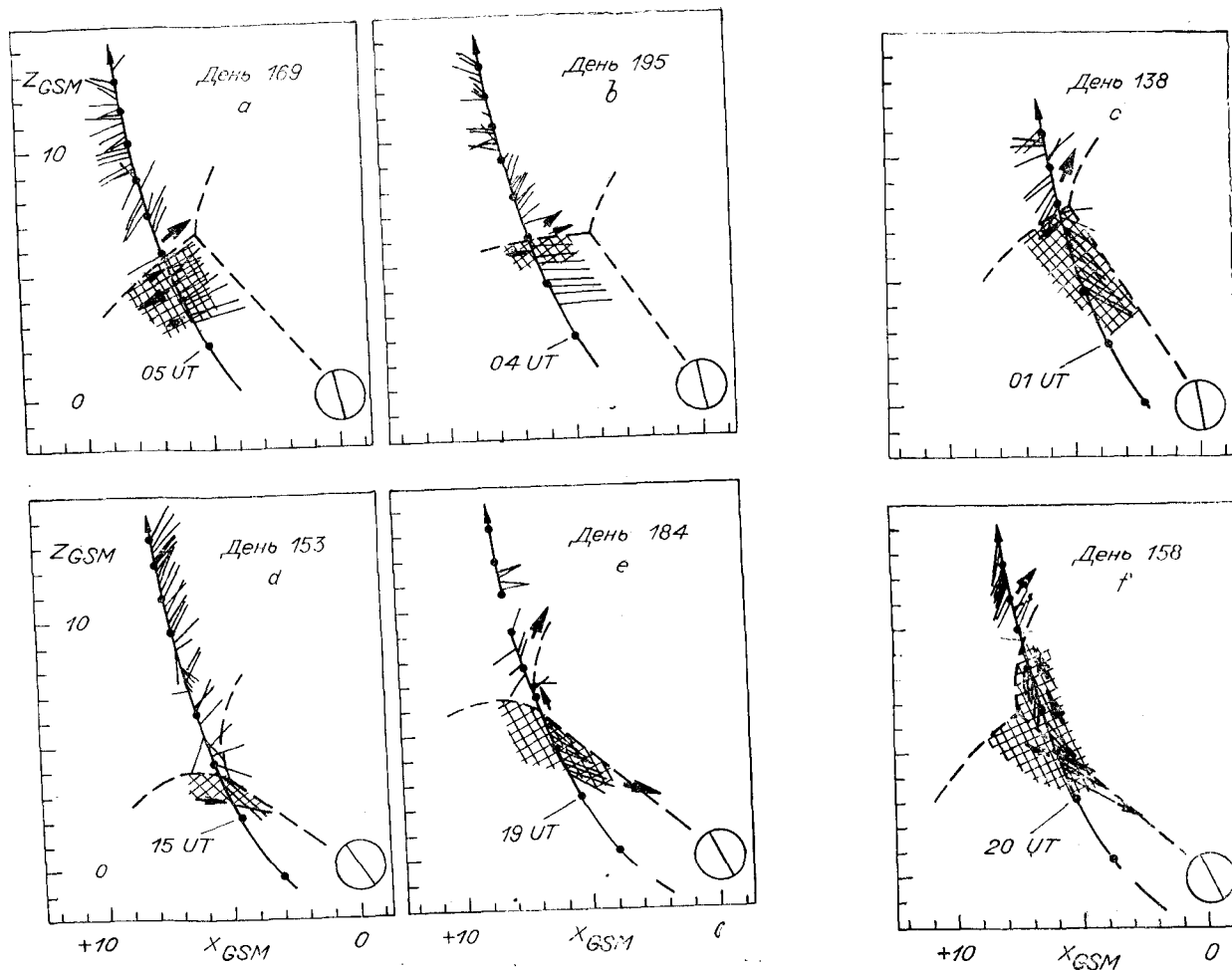


Рис. 22.

показанном на рис. 20, б, наблюдался плавный диффузный вход в магнитосферу.

На рис. 21 показаны три низкоширотных случая наблюдения диффузной магнитопаузы вблизи местного полудня на аппаратах «Прогноз» и «Прогноз-2». Толщина границы порядка  $1 R_E$ . Диффузная магнитопауза на

«Прогнозах» наблюдалась в области низких широт примерно в 40–50% случаев.

По данным ГЕОС-2 [31] были проанализированы шесть случаев наблюдения диффузной магнитопаузы или «входного слоя» на широтах  $33\text{--}53^\circ$  и долготах  $10\text{--}14^\circ$  в солнечно-магнитосферной системе координат.

На рис. 22 показаны все шесть участков орбит ГЕОС-2, когда наблюдался входной слой в плоскости полуденного меридиана, совпадающей с экваториальной плоскостью прибора, в которой проводились измерения, как уже было описано в разделе II.2.

Схематически показаны штрихами положение границы, отделяющей замкнутые силовые линии от уходящих в хвост разомкнутых силовых линий, т. е. положение каспа, а также наклон земного диполя; заштрихованная область соответствует плазме во входном слое. Жирными стрелками указаны направления течения плазмы; тонкими линиями показаны (в логарифмическом масштабе) величина и направление проекции  $B$  на

плоскость  $XZ$  с десятиминутным интервалом. На рис. 23 показаны характеристики плазмы и магнитного поля при пересечении магнитопаузы в случае 169-й орбиты. Обозначения на рис. 23 те же, что и на рис. 3 (разд. II).

Следует отметить, что в 1967 г. на геостационарном спутнике «ATS-1», имевшем круговую орбиту с  $R=6,6 R_E$

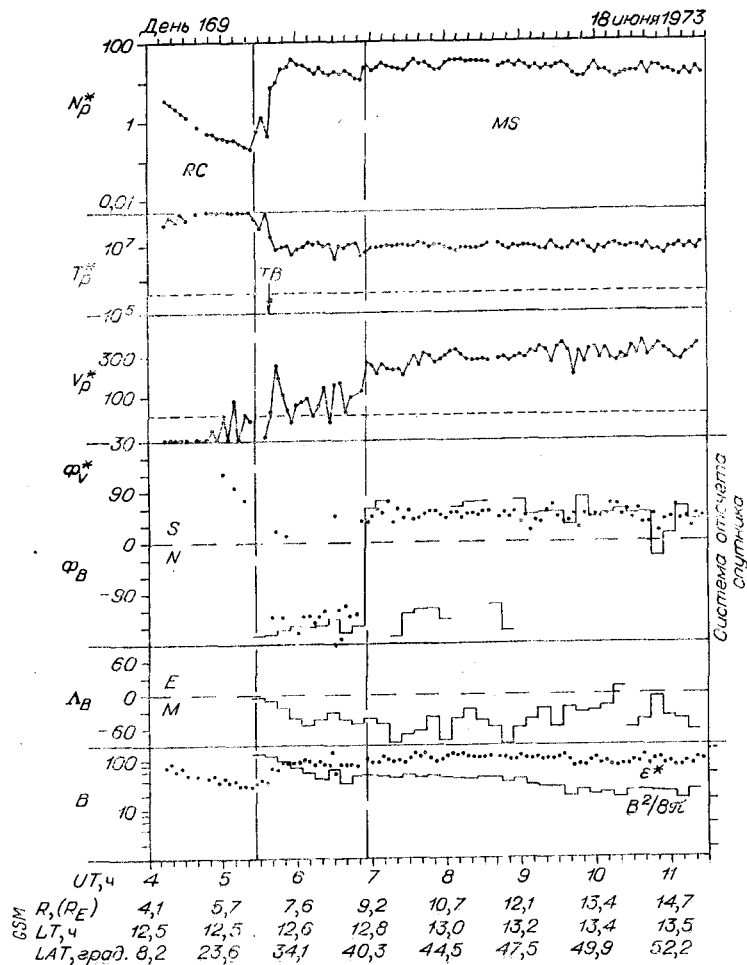


Рис. 23.

в экваториальной плоскости, авторы [32] наблюдали плазму, напоминающую по своим свойствам плазму переходного слоя вблизи магнитопаузы в магнитосфере во время бури, когда магнитопауза приближалась в области лобовой точки (13 ч  $LT$ ) к орбите спутника. Направление потока и его величина были такими же,

как в переходном слое, но магнитное поле, по данным измерений на том же спутнике [8], соответствовало магнитосферному.

Авторы [32] объясняют наблюдавшееся ими явление существованием вблизи магнитопаузы возвратного потока плазмы, совершающей конвекцию из хвоста на дневную сторону и возвращающейся назад в хвост через узкую область, прилегающую к магнитопаузе (рис. 24).

2. Основные свойства дневной диффузной магнитопаузы. Как следует из детального рассмотрения всех шести наблюдений входного слоя на ГЕОС-2 эта область магнитосферы характеризуется следующими свойствами.

1) Магнитопауза регистрировалась по резкому изменению направления магнитного поля (рис. 23, график  $\Phi_B$ ).

2) Внутри магнитосферы вплотную к магнитопаузе наблюдались потоки плазмы с концентрацией и температурой такой же, как в переходной области. Потоки были сильно нерегулярными, существенно изменялась функция распределения; направленная скорость потоков изменялась, и иногда ее не удавалось определить. Направление потоков было различным к Солнцу и от Солнца, но обычно вдоль магнитного поля. Иногда в слое наблюдались последовательно потоки различного направления при пролете спутника вглубь магнитосферы (рис. 22 и 23, график  $V_p$ ).

3) Наибольшую толщину слой имел вблизи каспа (см. рис. 22).

4) Величина магнитного поля во входном слое сильно флуктуировала, но направление поля не изменялось и соответствовало направлению магнитосферного поля (рис. 23, график  $B$ ).

5) Во входном слое  $\beta \approx 1$  (см. рис. 23).

6) Внутренний край входного поля перекрывал положение кольцевого тока. В этой области регистриро-

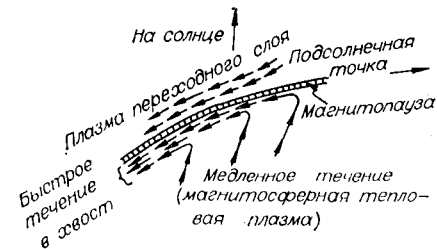


Рис. 24.

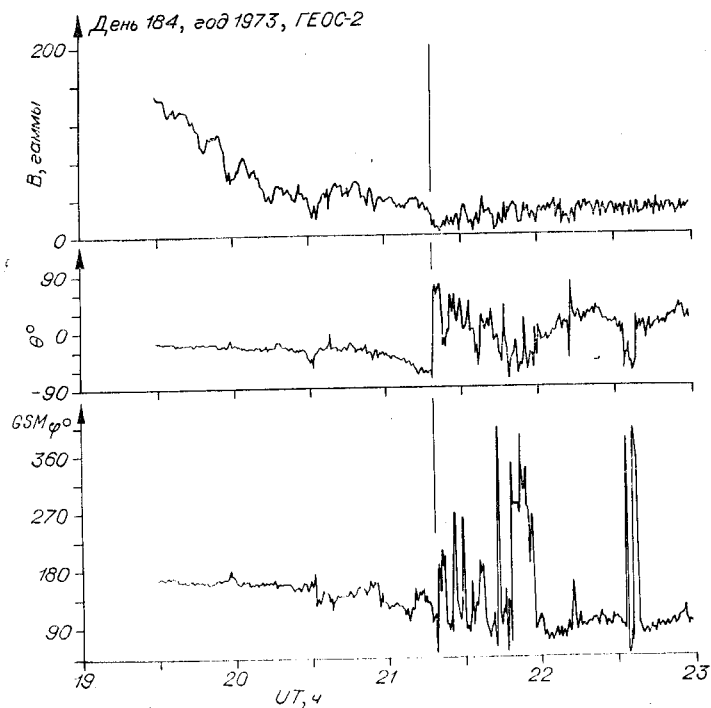


Рис. 25.

вались энергичные электроны, с питч-углами, свидетельствующими о том, что они захвачены магнитным полем и находятся на замкнутых силовых линиях (рис. 23).

7) Магнитопауза имела выемку типа каспа протяженностью 2 ч по местному времени. Форма магнитопаузы определялась по экспериментальным данным в следующем предположении: если магнитопауза представляет собой тангенциальный разрыв, то нормальная компонента поля к магнитопаузе равна нулю, а произведение векторов поля, измеренных внутри и вне магнитопаузы (усредненных за несколько минут), в таком предположении дает направление нормали  $n$  к магнитопаузе, а, следовательно, представление о форме магнитопаузы.

8) Наблюдались глубокие минимумы значений магнитного поля в области вблизи каспа (рис. 25).

$B \approx 1 \div 4 \gamma$ , причем ориентация внешнего и внутреннего полей по отношению к магнитопаузе была антипараллельной, чтобы можно было предположить, что происходила аннигиляция поля из-за пересоединения. Возможно, что наблюдавшееся уменьшение поля было связано с диамагнитным эффектом, создаваемым плазмой, но пространственное разрешение плазменных измерений не позволяло обнаружить изменения давления плазмы в области наблюдения минимума поля.

9) Угловое распределение протонов во входном слое часто имело сильную зависимость от энергии: протоны низких энергий ( $\leq 50$  кэВ) двигались от Солнца, т. е. в направлении магнитного поля, в то время как энергичные протоны приходили из южного направления, причем протоны с энергией 10 кэВ приходили почти точно из южного направления.

Иногда наблюдались противоположно направленные потоки протонов с энергией частиц выше и ниже 1 кэВ.

10) В одном из пролетов (№ 184) (см. рис. 22 и 23) при наблюдавшейся ориентации внешнего и внутреннего по отношению к магнитопаузе полей (угол  $\sim 150^\circ$ ) могло быть пересоединение, причем вблизи границы наблюдалась сильная депрессия поля вплоть до  $1 \gamma$  (см. рис. 25). Однако в области слабого поля, примыкающей к точке резкого поворота направления поля, полностью отсутствовали потоки плазмы.

Во всех же случаях пересоединения в соответствии с моделью Петчека и др. [33, 34] плазма должна выбрасываться из области пересоединения и течь в область слабого поля, разделяющего пересоединенные поля.

3. К вопросу о происхождении дневной диффузной магнитопаузы. Объем экспериментальных данных, полученных в настоящее время, пока недостаточен для понимания природы происхождения дневной диффузной магнитопаузы. Авторы экспериментов высказывали и проверяли различные гипотезы.

В работе [32] отмечалось, что поток плазмы внутри магнитосферы вблизи магнитопаузы может быть возвратным потоком плазмы, конвектирующей в магнитосфере.

Авторы экспериментов на «Прогнозах», исходя из своих данных, предполагали, что причиной может быть диффузия плазмы через границу и затекание в экваториаль-

ную и полярную щели (клефт), наблюдавшиеся как в лабораторных [35], так и в космических экспериментах [36, 37].

В работе [31] предполагалось, что главным механизмом является пересоединение межпланетного и геомагнитного полей, поскольку этот механизм может быть единой причиной образования как входного слоя, так и мантии. Напомним, что к этой гипотезе примыкает идея проникновения плазмы переходного слоя в дневную магнитосферу через «дырки» на дневной стороне [30]. Однако, как указывалось в разделе III.2, не было обнаружено экспериментальных доказательств пересоединения даже в тех случаях, когда оно должно было бы наблюдаться.

Против пересоединения свидетельствует также отсутствие постоянно существующих направленных от Солнца потоков энергичной плазмы во входном слое.

При переходе через вращательный разрыв плазма должна получать импульс в направлении от Солнца из-за освобождения энергии при изменении направления вектора  $\mathbf{B}$  в месте пересоединения [32, 33]. Следовательно, должны наблюдаться постоянные потоки более энергичной плазмы внутри магнитопаузы, текущие в анти-солнечном направлении, что противоречит наблюдениям.

Авторы [31], однако, предполагают, что причиной отсутствия четкой картины, характерной для пересоединения, являются каспы, отражающие текущие в анти-солнечном направлении потоки как переходного, так и входного слоев. Полярные фланги каспов представляют собой препятствие для плазмы переходного слоя, замедляющее и отклоняющее ее в касп. В этом случае вблизи магнитопаузы должен существовать тонкий пограничный слой с плазмой, текущей в антисолнечном направлении.

Одной из причин существования потока плазмы в дневной магнитосфере у ее границы может быть затекание плазмы переходного слоя через область вблизи нулевой точки или каспа, где по экспериментальным данным ГЕОС-2, как указывалось в предыдущем разделе, имеется депрессия поля протяженностью  $\sim 2$  ч. Поскольку в нейтральной точке  $\mathbf{B}=0$ , то в ее окрестности в магнитосфере существует область, где  $\mathbf{B}$  не влияет на движение частиц и куда может проникнуть плазма

переходной области. Граница этой области описывается уравнением  $B^2/8\pi = 2nkT_{e,i}$ , где  $n$ ,  $T_{e,i}$  — свойства плазмы переходного слоя,  $B$  — геомагнитное поле в окрестности нейтральной точки. Из этой области плазма движется в магнитосферу вдоль силовых линий, уходящих в касп, отражается в нем и движется на дневную и на ночную сторону, растекаясь по внутренней стороне границы магнитосферы.

Как показали оценки, проведенные одним из соавторов экспериментов на спутниках «Прогноз» М. И. Веригиным, толщина дневной диффузной границы на экваторе в соответствии с этой гипотезой должна быть  $\sim 1000$  км, и при приближении к каспу достигать  $2R_E$ . Растекающаяся из области депрессии поля плазма переходного слоя на дневной стороне может отражаться вблизи экватора и в области каспа противоположной полусферы и создавать нерегулярные потоки противоположного направления в диффузной магнитопаузе. Часть плазмы, затекающей из области нулевой точки глубоко в касп, отражается в каспе и может конвектироваться в хвост, образуя мантию так, как это было описано в [19].

Детальное исследование направления движения плазмы в слое, непосредственно прилегающем к магнитопаузе, на дневной стороне, должно помочь решению вопроса о происхождении дневной диффузной магнитопаузы.

Следует отметить актуальность исследования мантии и дневной диффузной магнитопаузы в магнитосфере Земли для понимания структуры магнитосфер других планет. Так, например, в экспериментах на советских искусственных спутниках Марса, аппаратах «Марс-2, 3 и 5» [42—44] было обнаружено явление, напоминающее диффузную магнитопаузу у Земли. Потоки плазмы вблизи границы марсианской магнитопаузы имели направление от Солнца, как и в переходной области, и их интенсивность зависела от интенсивности солнечного ветра. Потоки электронов при входе спутника вглубь магнитосферы Марса также уменьшались, но продолжали регистрироваться и при полной пропаже потоков ионов. По аналогии с земной магнитосферой [38—41] это могли быть потоки электронов плазменного слоя в магнитосфере Марса, примыкающего к диффузной магнитопаузе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жигулев В. Н., Ромишевский Е. А. О взаимодействии потоков проводящей среды с магнитным полем Земли.— «Докл. АН СССР», 1959, т. 127, № 5, с. 1001—1004.
2. Spreiter J. R., Jones W. P. On the Effect of a Weak Interplanetary Magnetic Field on the interaction between the Solar Wind and the Geomagnetic field.— "J. Geophys. Res.", 1963, v. 68, p. 3555—3565.
3. Dungey J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones.— "Phys. Rev. Lett.", 1961, v. 6, p. 47—58.
4. Sonnerup B. U. Ö., Cahill L. J. Jr., Magnetopause structure and attitude from Explorer 12 observations.— "J. Geophys. Res.", 1967, v. 72, N 1, p. 171—184.
5. Sonnerup B. U. Ö., Cahill L. J. Jr. Explorer 12 observations of the magnetopause current layer.— "J. Geophys. Res.", 1968, v. 73, N 5, p. 1757—1770.
6. Cummings W. D., Coleman P. J., Jr. Magnetic fields in the magnetopause and vicinity at synchronous altitude.— "J. Geophys. Res.", 1968, v. 73, N 17, p. 5699—5718.
7. Axford W. I., Hines C. O. A unifying theory of high latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms.— "Can. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 1443—1451.
8. Parker E. H. Confinement of a magnetic field by a beam of ions.— "J. Geophys. Res.", 1967, v. 72, N 9, p. 2315—2322.
9. Parker E. H. Small-scale nonequilibrium of the magnetopause and its consequences.— "J. Geophys. Res.", 1967, v. 72, N 17, p. 4365—4374.
10. Крымский Г. Ф., Ромащенко Ю. А. Магнитогидродинамическая модель магнитопазы и система глобальных электрических полей в магнитосфере Земли.— В кн.: Физика верхней атмосферы. ЯФСО АН СССР, 1975, с. 22—52.
11. Ковнер М. С. Взаимодействие солнечного ветра с геомагнитным полем.— В кн.: Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца, 1972, вып. 23, с. 262.
12. Intrilligator D. S., Wolf J. W. Evidence of a diffuse magnetopause boundary.— "J. Geophys. Res.", 1972, v. 77, N 28, p. 5480—5486.
13. Hones E. M. Jr., Asbridge J. R., Bame S. J., Singer S., Akasofu S. I. Measurements of magnetotail plasma flow made with Vela 413. "J. Geophys. Res.", 1972, v. 77, N 28, p. 5503—5522.
14. Akasofu S. I., Hones E. W. Jr., Bame S. J., Asbridge, Zui A. I. Magnetotail and boundary layer plasmas at a geocentric distance of  $\sim 18R_E$ : Vela 5 and 6 observations.— "J. Geophys. Res.", 1973, v. 78, N 31, p. 7257—7274.
15. Schopke N., Grünwaldt H. D., Montgomery M. D., Rosenbauer H. J. HEOS-2 data on the plasma mantle (abstract).— "EOS Trans. A. G. U.", 1974, v. 55, p. 978.
16. Rosenbauer H., Grünwaldt H. D., Haerendel G., Schopke N. The plasma mantle.— Preprint MPI—PAE Extrater. 108. January, 1975.
17. Безруких В. В., Бреус Т. К., Веригин М. И., Майсурадзе П. А., Ремизов А. П., Соломатина Э. К. Зависимость положений магнитопазы и околоземной ударной волны от параметров солнечного ветра и плазменная структура магнитосферы.— В кн.: Проблемы солнечной активности и космическая система «Прогноз» (в печати).
18. Bezrukikh V. V., Breus T. K., Verigin M. I., Maysuradze P. A., Remizov A. P., Solomatina E. K. Dependence of the Earth's magnetopause and bow shock positions on the solar wind parameters and the magnetopause plasma structure observed by charged particle traps aboard the "Prognoz" and "Prognoz-2" satellites.— Preprint D-192 Space Research Institute Academy of Sciences USSR, May, 1975, to be publ.
19. Rosenbauer H., Grünwaldt H. D., Montgomery M. D. e. a. HEOS-2 plasma observations in the distant polar magnetosphere: the plasma mantle.— "J. Geophys. Res.", 1975, v. 80, N 19, p. 2723—2737.
20. Howe H. W., Siscoe G. L. Magnetopause motions at lunar distance determined from the Explorer 35 plasma experiment.— "J. Geophys. Res.", 1972, v. 77, N 31, p. 6071—6086.
21. Hardy D. A., Freeman J. W., Kent H. Hill. Plasma observations in the magnetotail.— In: Preprint of the Department of Space Physics and Astronomy Rice University, Houston, Texas, to be presented to the MAGA Symposium Grenoble, August, 1975.
22. Bame S. I. Plasma sheet and adjacent regions.— In: The Earth's Particles and Fields. N. Y., 1968, p. 373.
23. Banks P. M., Holzer T. E. The polar wind — "J. Geophys. Res.", 1968, v. 73, N 21, p. 6846—6854.
24. Cauffman D. P., Gurnett D. A. Satellite measurements of high latitude convection electric fields.— "Space Sci Rev.", 1972, v. 13, p. 369—373.
25. Mozer F. S., Gonsales W. D., Bogott F., Kelley M. C., Schutz M. High—latitude electric fields and the three dimensional interaction between the interplanetary and terrestrial magnetic fields.— "J. Geophys. Res.", 1974, v. 79, N 1, p. 56—63.
26. Winningham J. D. Magnetospheric cleft plasma and substorm induced changes (abstract).— "EOS Trans. A. G. U.", 1974, v. 55, p. 67.
27. Hedgecock P. C. HEOS interplanetary field measurement, Bartels solar rotation plots of 3-hourly average, December 1968 — December 1972.— In: Preprint Imperial College Physics. Department. L. S. W. 7. October, 1973.
28. Schopke N., Pashman G., Rosenbauer H., Haerendel G., Hedgecock P. C. Influence of the interplanetary magnetic field on the occurrence and thickness of the plasma mantle.— Preprint "MPI-PAE/Extrater. 117", October, 1975.
29. Heppner J. P. Polar cap electric field distributions related to the interplanetary magnetic field direction.— "J. Geophys. Res.", 1972, v. 77, N 25, p. 4877—4888.
30. Cambu F., Galperin Yu. I. Resultates d'ansamble obtenus grace a l'experience ARCAD aboard satellite AUREOLE.— "Ann. Geophys.", 1974, v. 30, p. 9—16.
31. Pashmann G., Haerendel G., Schopke N., Rosenbauer H., Grünwaldt H. D. Plasma and magnetic field characteristics of the distant polar cusp near local Noon.— Preprint MPI-PAE/Extrater 114. August, 1975.
32. Freeman J. W., Jr., Warren C. S., Maguire J. J. Plasma flow directions at the magnetopause on January 13 and 14, 1967.— "J. Geophys. Res.", 1968, v. 73, N 17, p. 5719—5732.

33. *Levy R. H., Petschek H. E., Siscoe G. L.* Aerodynamic aspects of the magnetospheric flow.—“AIAA Journal”, 1964, v. 2, p. 2065.
34. *Vasyliunas V. M.* Theoretical models of magnetic field line merging 1.—“Rev. Geophys. Space Phys.”, 1975, v. 13, p. 303—335.
35. *Dubinin E. M., Podgorny I. M.* Particle precipitation and radiation belt in laboratory experiments.—“J. Geophys. Res.”, 1974, v. 79, N 10, p. 1426—1432.
36. *Frank L. A.* Plasma in the Earth's polar magnetosphere.—“J. Geophys. Res.”, 1971, v. 76, p. 5202—2220.
37. *Russel C. T., Chappel C. R., Montgomery M. D.* e. a. OGO-5 observations of the polar cusp on November 1, 1968.—“J. Geophys. Res.”, 1971, v. 76, p. 6743—6765.
38. *Vasyliunas V. M.* Low-energy electrons on the day side of the magnetosphere.—“J. Geophys. Res.”, 1968, v. 73, N 23, p. 7519—7524.
39. *Bame S. J., Asbridge J. R., Felthouser H. E.* e. a. Characteristics of the plasma sheet in the Earth's magnetotail.—“J. Geophys. Res.”, 1967, v. 72, N 1, p. 113—131.
40. *Frank L. A.* Recent observations of low energy charged particles in the Earth's magnetosphere.—In: Physics of the magnetosphere. Dordrecht — Holland, 1968. 271p.
41. *Gringauz K. I.* Review of data on interaction of solar wind with Mars, obtained by means of charged particle traps from Mars-2, and 5 satellites.—“Preprint 220. Space Research Institute Academy of Sciences USSR, Grenoble, August, 1975.
42. *Dolginov Sh. Sh., Eroshenko Ye. G., Gringauz K. I., Zhuzgov L. N., Sharova V. A., Bezrukikh V. V., Breus T. K., Verigin M. I., Remisov A. P.* Magnetic field and plasma inside and outside of the martian magnetosphere.—IN: Solar-wind interaction with the planets Mercury, Venus and Mars, NASA Sp-397, A seminar held at Moscow USSR, November 17—21, 1975, Washington D. C., 1976, p. 1.
43. *Бреус Т. К., Веригин М. И.* Сопоставление результатов измерений плазмы и магнитного поля на спутнике «Марс-2» 8 января 1972 г.—«Космические исследования», 1976, т. 14, № 3, с. 400—405.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А. Е. Антонова

При разработке количественных моделей магнитосферного поля ставится цель создания математического описания геомагнитного поля, которое находится в хорошем согласии с результатами измерений. Первые попытки определения границы и распределения магнитного поля внутри магнитосферы были предприняты задолго до систематических спутниковых исследований взаимодействия солнечной плазмы с геомагнитным полем [1].

Магнитное поле в магнитосфере Земли создается несколькими источниками, относительная важность которых определяется их положением относительно исследуемой области магнитосферы. Вблизи Земли доминирующую роль играет собственное поле Земли, создаваемое внутривоздушными источниками. В других областях существенны магнитные эффекты внешних относительно Земли электрических токов: токов на магнитопаузе  $V_{мп}$ , токов в нейтральном слое хвоста магнитосферы  $V_t$ , кольцевого тока  $V_R$ , системы токов вдоль силовых линий, связанных авроральным овалом, токов замыкания во внешней магнитосфере и ионосфере, экваториальной электроструи. Поскольку до настоящего времени учет различных источников магнитосферного поля производился, как правило, без решения полной несогласованной задачи, то при использовании каждой отдельной модели необходимо четко представлять область ее применимости и возможные ограничения и эффекты, обусловленные несогласованным учетом источников и их приближенным соответствием реально наблюдаемой картине.