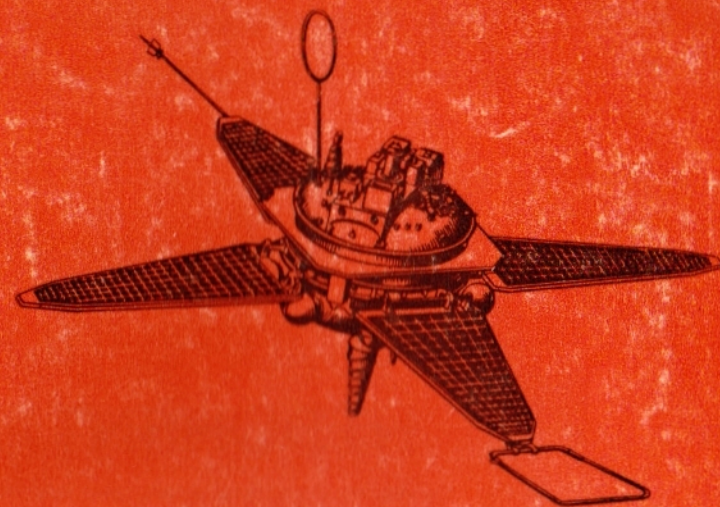


1 р. 70 к.



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



ИЗДАТЕЛЬСТВО • НАУКА •

АСИММЕТРИЯ ПЛАЗМОСФЕРЫ В НАПРАВЛЕНИИ ПОЛДЕНЬ — ПОЛНОЧЬ И ЕЕ ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ «ПРОГНОЗ» и «ПРОГНОЗ-2»

К. И. Грингауз, В. В. Безруких

Введение

Первые сведения о суточных изменениях высоты границы плазмосферы Земли — плазмопаузы были получены по наземным наблюдениям свистящих атмосфериков, дающих информацию о положении плазмопаузы в плоскости геомагнитного экватора [1]. Важной особенностью этих изменений является повышение высоты плазмопаузы в вечерние часы, за которым закрепилось название «выпуклость». Измерения локальной ионной концентрации на станциях «Электроне-2 и -4» [2] и ОГО-5 [3–7], подтвердили увеличение высоты в вечерние часы, причем, по данным наблюдений на ОГО-5, эта выпуклость в среднем симметрична относительно меридиана 06.00–18.00 LT [5].

Наличием асимметрии плазмосферы в направлении утро — вечер может быть удовлетворительно объяснено в предположении, что плазмопауза должна быть эквипотенциальной поверхностью и, следовательно, ее форма определяется конфигурацией крупномасштабных электрических полей в магнитосфере. В экваториальной плоскости конвекция плазмы, как это предполагалось рядом авторов, создает однородное электрическое поле поперек магнитосферы, направленное с утра на вечер; сложение этого поля с радиальным по отношению к Земле электрическим полем, создаваемым за счет коротации околосферной плазмы, приводит к вытянутой в направлении утро — вечер форме внешней эквипотенциали, близкой по форме и по размерам к плазмопаузе, наблюдавшейся при помощи свистящих атмосфериков и спутников [8–10].

Следует заметить, что еще в 1968 г. автор [11] отмечал, что указанные представления являются чрезмерно упрощенными. В 1970 г. автор [12] отметил, что конвекция в магнитосфере должна сильно зависеть от закона распределения проводимости в ионосфере. В [12] приведены расчеты эквипотенциальных поверхностей в экваториальной плоскости магнитосферы при различных предположениях о распределении проводимости в ионосфере. Число рассчитанных вариантов в [12] было велико, но, к сожалению, автор не рекомендовал какого-либо из них в качестве предпочтительного. Из [12], однако, можно заключить, что различие дневной и ночной проводимости ионосферы может приводить к асимметрии плазмопаузы в направлении день — ночь.

В [6] рассмотрен ряд особенностей дневной плазмосферы по данным наблюдений на спутнике ОГО-5, однако в числе этих

особенностей не отмечается асимметрия ионосферы относительно меридиана 6.00–18.00 LT (т. е. в направлении полдень — полночь), а в [7] лишь обсуждается возможность такой асимметрии, которая рассматривается как результат «провалов» в профилях ионной концентрации, возникающей при изменениях геомагнитной активности. Плазмосферные измерения ионной концентрации $n_i(L)$, проведенные при помощи ловушек заряженных частиц на «Прогнозе», «Прогнозе-2» показали, что граница плазмосферы вблизи полудня расположена, особенно в относительно магнитноспокойные периоды, на значительно более высоких L -оболочках, чем вблизи полуночи, причем эта асимметрия по величине сопоставима с хорошо известной выпуклостью плазмосферы в вечернем секторе.

Ниже приводятся сведения о тепловой структуре дневного сектора плазмосферы по данным станции «Прогноз».

Тепловая структура плазмосферы (распределение заряженных частиц) важна для понимания физических процессов в ней. Зная, где расположены области повышенной температуры, можно локализовать источники тепла; величины эффективных температур ионов T_i и электронов T_e нужны также при рассмотрении баланса давлений на плазмопаузе. Однако экспериментальные определения этих величин весьма малочисленны (и выполнены до настоящего времени всего двумя научными группами: одной в СССР, другой в США). После первой оценки порядка величины ($T_i \sim 10\,000$ К), сделанной в 1960 г. по данным измерений на второй космической ракете [13], авторы работы [14] провели измерения на спутнике ИМП-2 (1966 г.), результаты которых вызвали некоторые сомнения [15]. В 1967 г. авторы [15, 16] произвели оценки T_i в плазмосфере по данным со станции «Электрон-2». Последние и наиболее полные из известных нам опубликованных данных по температуре ионов в плазмосфере были приведены в 1970 г. [17] по измерениям, выполненным методом тормозящих потенциалов на спутнике ОГО-5 в области, близкой к экваториальной плоскости (наклонение орбиты ОГО-5 30°).

Согласно [17], величина T_i с ростом геоцентрического расстояния R (которое в случае ОГО-5 весьма близко к L -координате Мак-Иллвейна) увеличивается постепенно — при $\sum K_p \leq 11$, где $\sum K_p$ — сумма K_p -индексов за сутки, или, осциллируя — при $19 \leq \sum K_p \leq 27$, от величин порядка нескольких тысяч градусов Кельвина при $L < 2$ до $T = 10^5$ К при $L = 4 \div 4,5$; авторы [17] наблюдали также резкое (скачкообразное) повышение T_i на плазмопаузе при $K_p > 15$.

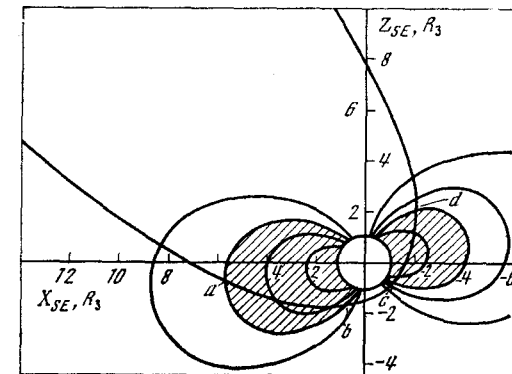
1. Измерение распределения концентрации ионов

Результаты. Подробное описание аппаратуры, установки ее на станциях «Прогноз» и методика обработки данных содержатся в [18]. Напомним только, что каждая станция во время каждого

Таблица 1. Параметры измерений

Рис. 2	Станция	Дата	Участки орбит	Время		Индекс	
				УТ	ЛТ	K_p	ΣK_p
Позиция I	«Прогноз»	4.V	A	05.40	13	1+	14
			B	07.15	02	1+	14
	То же	8.V	A	05.20	12	1-	5+
			B	18.30	02	1-	5+
	»	12.V	A	06.10	13	3	17
			B	09.10	02	3	17
	»	28.V	A	10.30	11	3-	18+
			B	13.50	00	3+	21
»	25.VI	A	17.20	10	2-	17-	
		B	20.44	00	2-	16-	
Позиция II	«Прогноз-2»	16.VIII	A	11.21	14	1	15-
			B	16.00	03	1+	15-
	То же	20.VIII	A	13.40	14	3	21-
			B	16.50	03	3	20+
	»	24.VIII	A	14.40	13	1-	4
			B	17.50	14	1-	4+
	»	28.VIII	A	15.50	13	3-	14-
			B	08.40	02	1+	14-
	»	3-4.VIII	A	22.50	11	1	8
			B	01.30	00	2+	8
»	7-8.VIII	A	22.40	10	3	9-	
		B	02.25	23	4	12-	
Позиция III	«Прогноз-2»	11.VII	A	05.32	16	1	13+
			B	08.06	06	1+	15-
	То же	19.VII	A	06.28	16	2-	8
			B	09.44	05	1+	8+
	»	23.VII	A	08.15	16	3	16+
			B	10.40	05	2	18
»	31.VII	A	09.18	15	1	9+	
		B	12.47	04	0+	9+	
Позиция IV	«Прогноз»	16.V	A	08.21	12	4-	29
			B	10.36	01	4-	29
	«Прогноз-2»	17.IX	A	20.16	12	3+	32
			B	22.30	01	3	31-
	То же	29-30.IX	A	23.00	11	5	29+
			B	00.50	01	4-	30

Рис. 1. Проекция околоземного участка орбиты станции «Прогноз» 28 мая 1972 г. на плоскость XZ солнечно-эклиптической системы координат



оборота вокруг Земли пересекала плазмосферу четыре раза на различных высотах. Для иллюстрации этого на рис. 1 приведена проекция околоземного участка орбиты станции «Прогноз» на плоскость XZ солнечно-эклиптической системы координат во время пролета 28 мая 1972 г. Здесь использованы только данные пересечений плазмосферы на больших высотах ($h > 10000$ км — точки a и d); анализ данных, относящихся к малым высотам (точки c и c'), будет опубликован в дальнейшем.

На рис. 2 (позиции I — IV) и в табл. 1 приведены высотные профили ионной концентрации по данным измерений. Для удобства сопоставления с ранее опубликованными результатами измерений n_i (например, в [3—7]) на оси абсцисс помимо высот приводятся величины соответствующих L-координат: универсальное время UT и местное LT соответствуют двум указанным выше пересечениям границы плазмосферы. Станция проходит рассматриваемый участок орбиты от первого входа в плазмосферу до последнего выхода из нее за 3—5 час, при этом местное время меняется на 10—14 час.

Значения K_p -индексов, соответствующие входу станций в плазмосферу на нисходящих участках витков (рис. 2, позиции I—IV, A), суммы K_p -индексов за сутки, предшествующие входу станции в плазмосферу, а аналогичные значения на восходящих участках витков (рис. 2, позиции I—IV, B) даны в табл. 1.

На рис. 2 (позиция I) приведен ряд профилей, полученных со станции «Прогноз» в магнитно-спокойные и умеренные магнитно-возмущенные периоды (во время измерений $K_p \leq 3$, сумма K_p за сутки, предшествующие выходу станции из плазмосферы, $\Sigma K_p \leq 21$). Местное время в момент входа станции в плазмосферу на нисходящем участке 10.00—14.00, при выходе из плазмосферы 22.00—02.00.

На рис. 2 (позиция II) приведены аналогичные данные со станции «Прогноз-2»; при выходе из плазмосферы на восходящем участке у этой группы данных местное время соответствует интер-

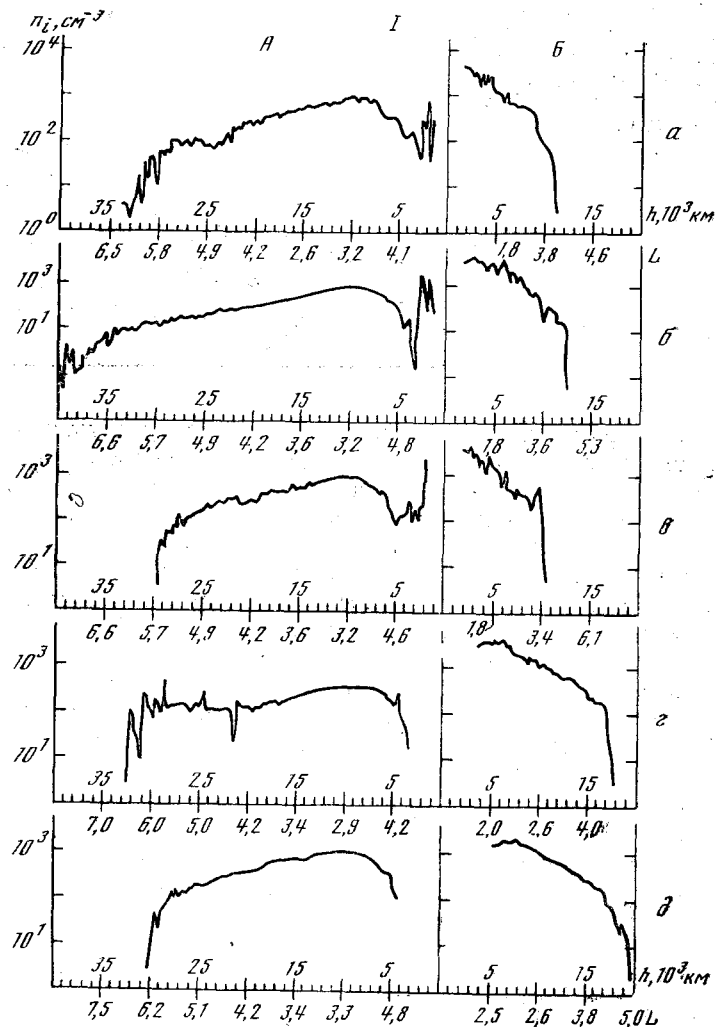


Рис. 2. $n_i(L)$ -профили ионной концентрации по данным измерений на станциях «Прогноз» и «Прогноз-2» в мае — октябре 1972 г. в полуденном и полуночном секторах магнитосферы (I, II), в вечернем и утреннем секторах магнитосферы (III) в магнитно-спокойных и умеренно возмущенных периодах и в полуденном и полуночном секторах в магнитно-возмущенных периодах (IV) на нисходящих (А) и восходящих (Б) участках орбит [времена и величина K_p -индексов (см. табл. 1) относятся к моментам пересечения плазмоспаузы]

валу от 23.00 до 04.00. На каждой паре приведенных на рис. 2 (позиции I, II) графиков можно видеть существенные различия между $n_i(L)$ -профилями, полученными вблизи местного полудня и местной полуночи. Прежде всего величина L на дневной стороне

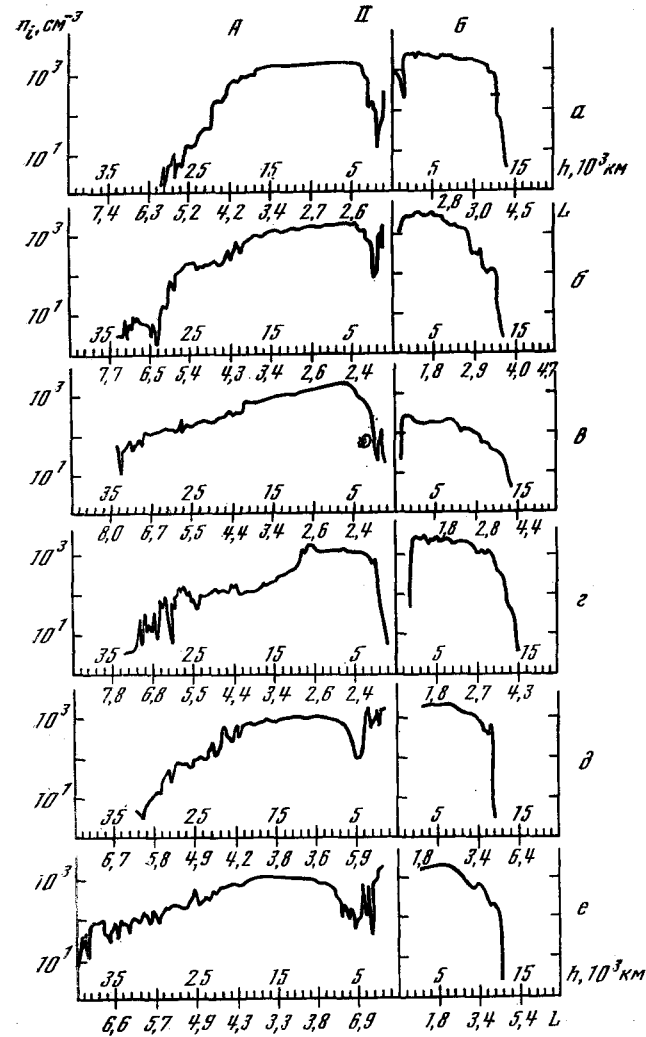


Рис. 2 (продолжение)

плазмоспаузы значительно больше, чем на ночной (это отличие нигде не меньше одной L -единицы, а в большинстве случаев является существенно большим). Кроме того, для графиков $n_i(L)$ на рис. 2 (позиции I и II) соответствующих дневной плазмосфере, типично более постепенное уменьшение n_i по сравнению с резкими спадами концентрации в ночной плазмосфере; в некоторых случаях (например, графики рис. 2, позиция I, а, б и позиция II, д, е) уменьшение n_i на дневной стороне сопровождается значи-

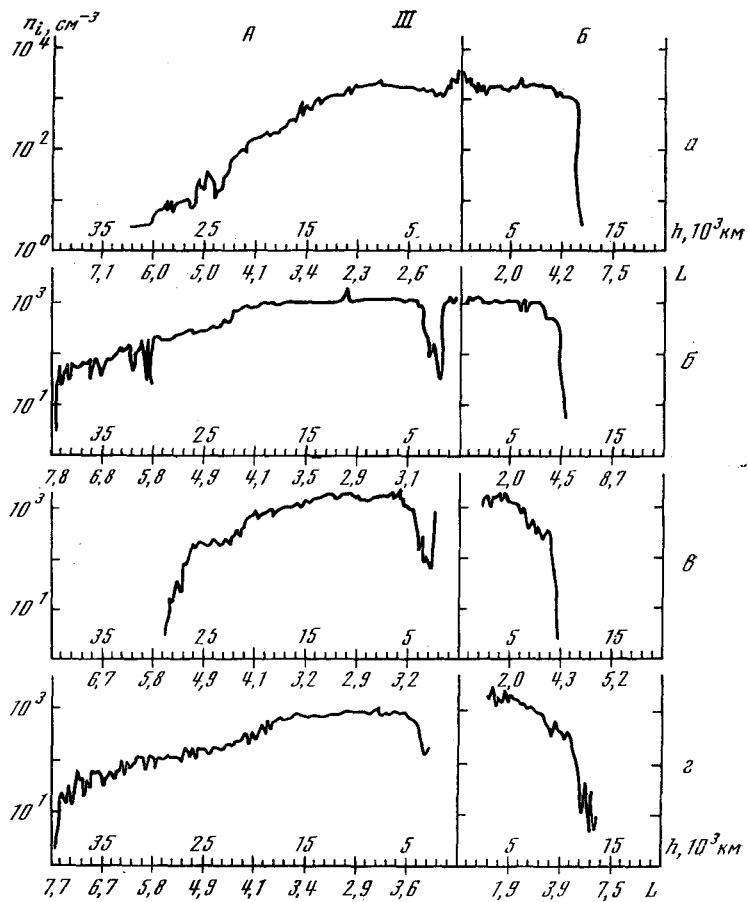


Рис. 2 (продолжение)

тельными колебаниями величин n_i (при $n_i < 10^2 \text{ см}^{-3}$), не наблюдаемыми на ночной стороне. На рис. 2 (позиция III), также характеризующем распределение n_i в спокойных геомагнитных условиях, можно сравнить $n_i(L)$ -профили, относящиеся к 15.00—16.00 LT, с утренними профилями (04.00—06.00 LT). Можно видеть, что в послеполуденные часы сохраняются как значительная протяженность плазмосферы, так и сравнительно медленный спад n_i , тогда как для утреннего сектора, так же как и для ночного, характерна четкая плазмоспауза, расположенная на сравнительно малых L .

На рис. 2 (позиция IV) приведены $n_i(L)$ -профили, относящиеся к магнитно-возмущенным условиям. Из этих графиков видно, что асимметрия дневной и ночной плазмосферы в магнитно-возмущенном периоде уменьшается.

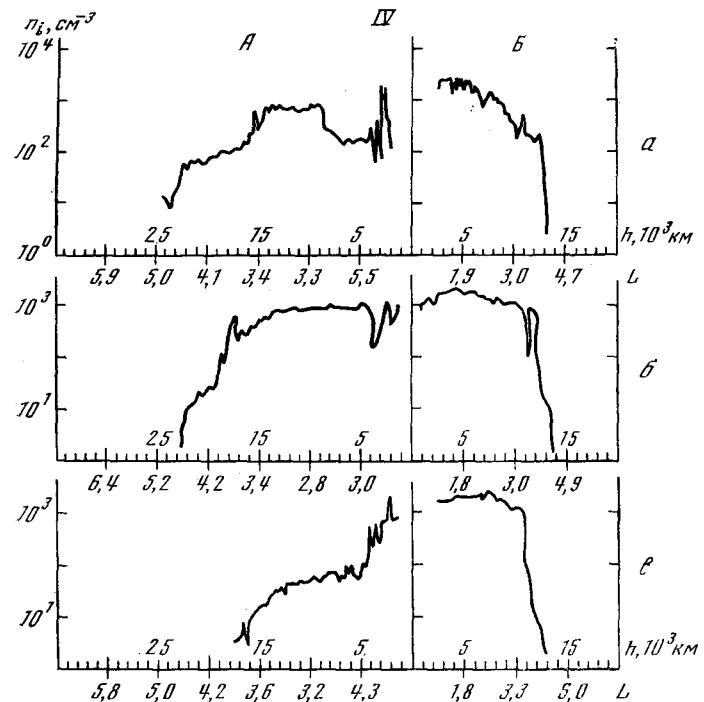


Рис. 2 (окончание)

Асимметрию плазмосферы относительно меридиана 06.00—18.00 LT (в направлении полдень—полночь) для каждого пролета станции можно оценить величиной $\Delta L_{dn} = L_d - L_n$, где L_d — это L -координаты полуденной плазмоспаузы, а L_n — полуночной. По данным станций «Прогноз» и «Прогноз-2» для спокойных и умеренно возмущенных условий средняя величина $\Delta L_{dn} = 1,6$, а при сильных возмущениях она может падать почти до нуля.

Заметим, что по данным тех же станций при спокойных условиях асимметрия плазмосферы относительно меридиана 00.00—12.00 LT (в направлении утро — вечер) составляет в среднем $\Delta L_{da} = 2,5$ (данных относительно ΔL_{da} при возмущениях, полученных на этих станциях, недостаточно для выводов).

Таким образом, описываемые измерения обнаружили асимметрию плазмоспаузы 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.

Обсуждение. Необходимо сравнить приведенные выше данные с ранее опубликованными. Различия высот плазмоспаузы в полдень и в полночь не отмечены в результатах, полученных по наблюдению

ниям свистящих атмосфериков [1, 19]; причины этого нуждаются в анализе.

Особенностям дневной плазмопаузы посвящена специальная работа [6], основанная на результатах прямых измерений на спутнике ОГО-5, а также часть обзора [7]; 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 [7]. К ним относятся большая постепенность уменьшения n_i при увеличении L на дневной стороне, чем на ночной (можно согласиться с тем, что одной из причин этого является известное из [20—22] существование потоков плазмы, поднимающихся вверх по магнитным силовым трубкам из дневной ионосферы.) В наших данных, как и в [6], в ряде случаев при $L > 6$ наблюдается осциллирующий ход при спаде n_i , объясняемый в [6] процессами отделения холодной плазмы от дневной плазмосферы.

Рассмотрение отдельных $n_i(L)$ -профилей, приведенных в цикле работ [3—7], показывает, что по данным этих профилей высота (L -координата) дневной плазмопаузы часто заметно превышала высоту ночной (см., например, рис. 5 в [4], где левые графики соответствуют дневным часам, а правые — ночным; последнее не указано в [4], но следует из [3]).

Однако, как уже отмечалось, на приведенной в [6, 7] кривой усредненных суточных измерений L -координаты плазмопаузы (воспроизводимой на рис. 3), хотя и можно заметить некоторую асимметрию в направлении полдень — полночь, но она очень мала ($\Delta L_{dn} \approx 0,5$), и авторы [6] не уделили ей внимания. По данным станций «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 [3—7], если значительную часть периода измерений на ОГО-5, данные которых были использованы для построения «средней» плазмопаузы, занимали геомагнитные возмущения, во время которых полуденно-полуночная асимметрия плазмопаузы уменьшается (следует иметь в виду, что 1968—1969 годы, к которым, по-видимому, относятся данные [3—7], были годами максимума солнечной активности).

Следует отметить, что в обзоре [7], посвященном морфологии и динамике плазмосферы по данным прямых измерений, в разделе, относящемся к крупномасштабным «провалам» концентрации заряженных частиц в $n_i(L)$ -профилях, автор привел две возможные схемы изменений размеров плазмосферы и ее формы при изменяющейся геомагнитной активности, включающих образование асимметрии в направлении полдень — полночь. Эти схемы воспроизведены на рис. 4; случай, приведенный на рис. 4, а, соответствует росту геомагнитной активности ($\Delta L_{dn} > 0$), случай,

Рис. 3. Проекция плазмопаузы на экваториальную плоскость по данным масс-спектрометра на спутнике ОГО-5 [6]

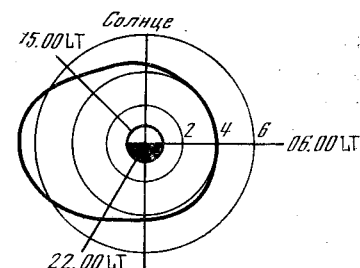
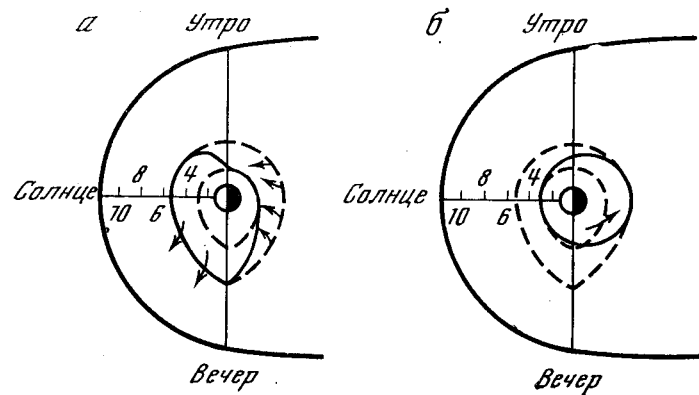


Рис. 4. Динамика плазмосферы при изменении геомагнитной активности согласно [7] а — рост геомагнитной активности, б — убывание активности



приведенный на рис. 4, б, в — убыванию активности ($\Delta L_{dn} < 0$).

Результаты измерений на «Прогнозе» и «Прогнозе-2», содержащие полуденно-полуночную асимметрию плазмопаузы, не согласуются со схемой рис. 4. Наибольшие значения ΔL_{dn} получены во время длительных магнитно-спокойных периодов, когда суммы K_p -индексов как за сутки, предшествующие измерениям (ΣK_p)₁, так и за сутки после измерений (ΣK_p)₂ были близки друг к другу и малы по величине. Так, например, 24 августа 1972 г. $\Delta L_{dn} = 3,4$ (ΣK_p)₁ = 4, (ΣK_p)₂ = 6₊; 28 августа — $\Delta L_{dn} = 3$, (ΣK_p)₁ = 15₋, (ΣK_p)₂ = 16₊; 7 ноября — $\Delta L_{dn} = 3$, (ΣK_p)₁ = 9₋, (ΣK_p)₂ = 10₊.

Таким образом, значительно большая высота плазмопаузы в полуденные часы по сравнению с полуночными является характерной чертой спокойной магнитосферы, а не возмущенной.

Нам представляется, что асимметрия плазмосферы относительно меридиана утро — вечер с точки зрения существующих представлений о магнитосферно-ионосферных связях является вполне естественной, а изучение ее — важным для уточнения сведений о магнитосферной конвекции, т. е. крупномасштабных электрических полях в магнитосфере.

Можно отметить, по крайней мере, три причины, по которым эта асимметрия должна существовать.

1. Общая несимметричность дневной и ночной частей магнитосферы, в частности электрических полей в подсолнечной части магнитосферы и в ее ночной части. Поскольку конвективный поток плазмы, движущийся в направлении к Солнцу из хвоста магнитосферы, приближаясь к подсолнечной части магнитопаузы, неизбежно должен изменить направление и должна появиться компонента скорости, перпендикулярная линии Солнце — Земля, то на дневной стороне магнитосферы в экваториальной плоскости должна иметься компонента электрического поля конвекции, нормальная магнитопаузе. Такая компонента электрического поля должна создать различие в форме дневной и ночной частей плазмопаузы (если считать ее эквипотенциальной поверхностью).

2. Более высокая проводимость дневной ионосферы, на которую опираются магнитосферные силовые трубки, производит закорачивающее действие, уменьшающее разность потенциалов поперек экваториальной проекции магнитосферы и 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, а большее электрическое поле на ночной стороне должно приближать эквипотенциаль (плазмопаузу) к Земле. Таким образом, различие проводимости дневной и ночной ионосферы также способствует возникновению асимметрии в направлении ночь — день.

3. Через силовые трубки, опирающиеся на дневную ионосферу поднимаются потоки протонов, заполняющие плазмосферу, а через ночные силовые трубки идут вниз потоки протонов плазмосферы, поддерживающие существование ночной ионосферы после прекращения действия ионизирующего излучения Солнца. Эти процессы замедляют уменьшение n_i по мере приближения к границе плазмосферы на дневной стороне и ускоряют падение n_i на ночной стороне плазмосферы.

2. Распределение T_i в дневном секторе плазмосферы

Результаты измерений. На рис. 5 (позиция I) и в табл. 2 приведены результаты измерений определения T_i во время четырех последовательных прохождений станции «Прогноз» вблизи Земли 8, 12, 16 и 20 мая 1972 г. В левой части рисунка приведены графики T_i и n_i , по оси абсцисс отложены высоты h и L -координаты; правая часть иллюстрирует движение станции через L -оболочку и относительно плоскости геомагнитного экватора (изображена условная меридиональная плоскость, в которой параметрам реального движения в трехмерном пространстве соответствуют величины L и углы между направлением от центра Земли к станции и экваториальной плоскостью).

Распределения T_i и n_i на рис. 5 (позиция I, а) получены после продолжительного весьма спокойного периода, перед началом слабого возмущения, L -координата дневной плазмопаузы $\sim 7,5$.

Таблица 2. Параметры измерений

Рис. 5	Дата	Индекс			
		K_p	K_{pm}	$(\Sigma K_p)_1$	$(\Sigma K_p)_2$
Позиция I					
а	8.V	0 ₊	1 ₋	4 ₊	18
б	12.V	3 ₋	3	18	1
в	16.V	4 ₋	8	30	18
г	20.V	1 ₋	2	8	9
Позиция II					
а	17.VI	7 ₋	7 ₋	36	55
б	21.VI	2 ₊	2 ₊	9	18
в	25.VI	1	2 ₋	14	18

Примечание. K_p -индекс в момент начала измерения в плазмосфере; K_{pm} — максимальное значение K_p -индекса за сутки, предшествующие измерениям; $(\Sigma K_p)_1$ — сумма K_p -индексов за сутки, предшествующие измерениям; $(\Sigma K_p)_2$ — сумма K_p -индексов за сутки после измерений.

Если мы условно назовем зону, в которой $T_i < 8000$ К, «холодной», а зону, в которой $T_i \geq 25000$ К, «горячей», то можно отметить, что внешняя граница холодной зоны соответствует $L \approx 4$, а внутренней граница горячей зоны находится на $L = 4,4$. При увеличении h от 4000 до 8000 км и убывании L величина T_i уменьшается; на высотах $h \sim 8000 - 17000$ км при $L < 3,7$ сохраняет низкие значения (4200—6000 К) и лишь на высотах $h > 17000$ км ($L > 3,7$) T_i начинает расти при возрастании h . При этом значения T_i при одинаковых величинах L , но существенно различных h примерно одинаковы. Внимательное рассмотрение измеренных величин T_i показывает, что на данной L -оболочке T_i несколько выше при малых, чем при больших h ; это может быть важным для локализации участков силовых трубок, в которых диссипирует энергия, нагревающая плазму; однако в грубом приближении, используемом в этой статье, L -оболочки считаются квазиэквипотенциальными (имеется в виду T_i).

В случае, соответствующем рис. 5 (позиция I, а), между холодной и горячей зонами плазмосферы находится «промежуточная» зона, в которой величина T_i при увеличении L постепенно повышается.

Следующие измерения были проведены 12 мая (рис. 5, позиция I, б), во время слабого возмущения ($K_p = 3$); предшествующий период был также слабо возмущенным ($(\Sigma K_p)_1 = 18$). Внешняя граница холодной зоны и величина T_i в этой зоне и ее положение в L -координатах и T_i промежуточной зоны почти не изменялись

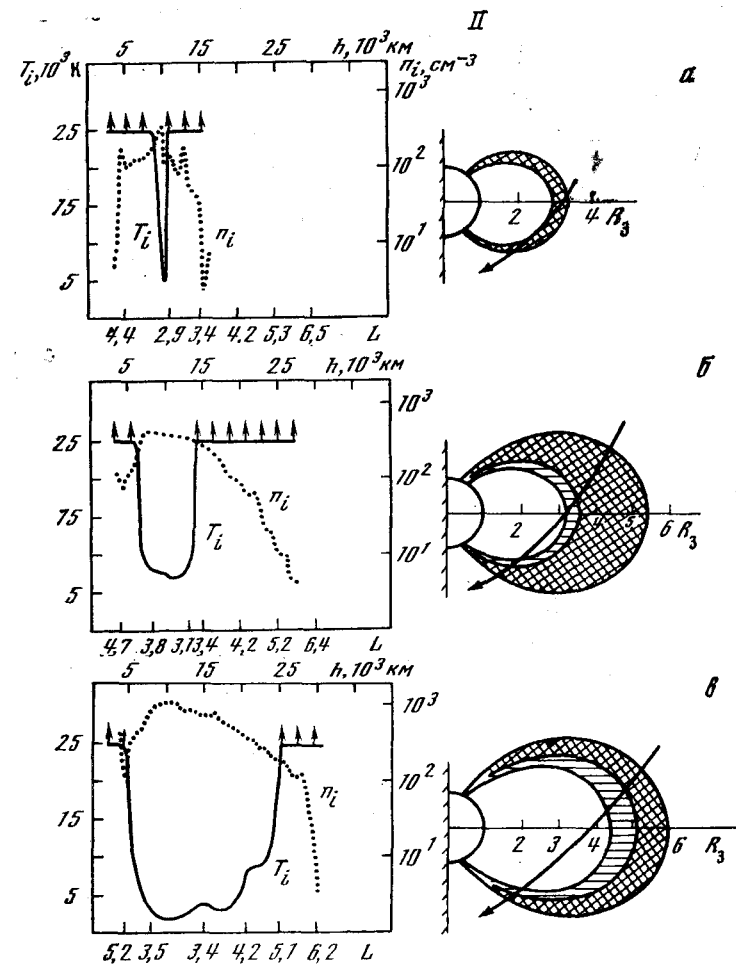
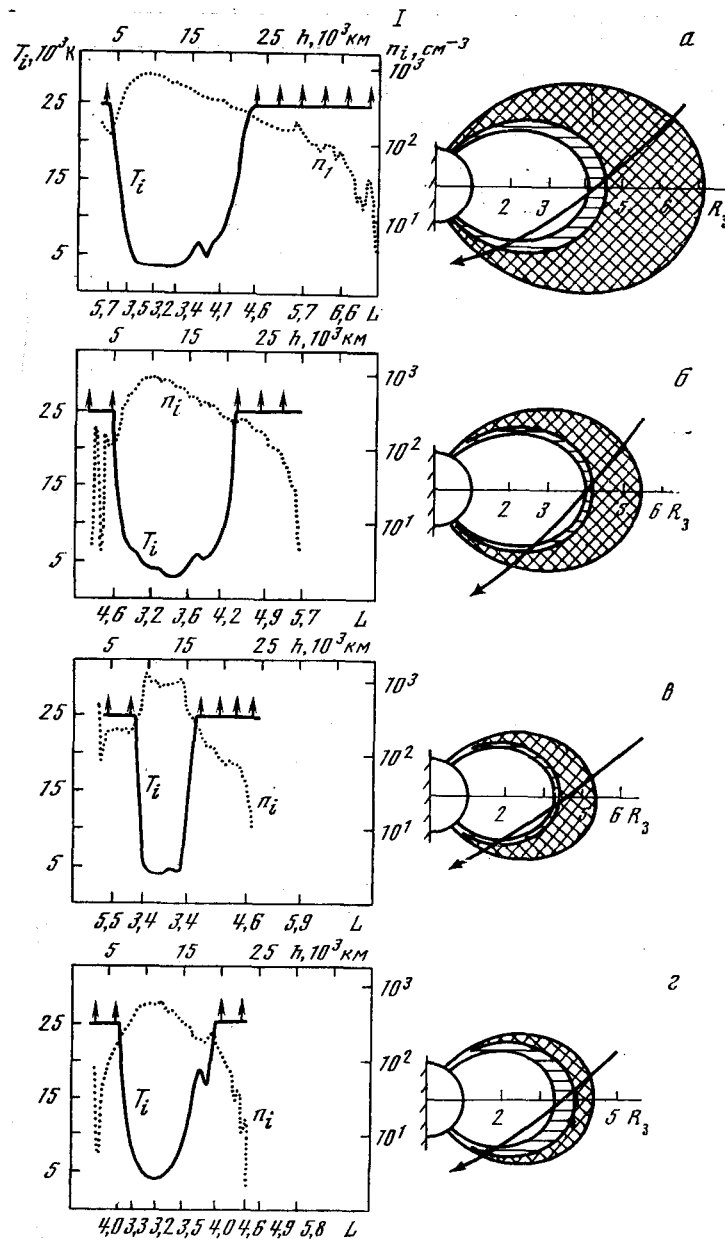


Рис. 5. $T_i(L)$ - и $n_i(L)$ -профили, измеренные во время прохождения через плазму станции «Прогноз» в мае (I) и в июне (II) 1972 г. в процессе фаз развития и восстановления магнитной бури 17 июня 1972 г.

Сеткой отмечена «горячая» зона, штриховкой — зона с $8000 \text{ K} \leq T_i \leq 25000 \text{ K}$, незаштрихованная область — «холодная» зона

по сравнению с рис. 5 (позиция I, а), однако плазмопауза значительно приблизилась к Земле (почти на 2 L -единицы) и соответственно размеры горячей зоны уменьшились.

Следующее измерение было проведено 16 мая, во время начавшей ослабевать интенсивной геомагнитной бури (рис. 5, позиция I, в), которая началась 15 мая. Величина T_i в холодной зоне практически не изменилась, а ее размеры изменились сравнительно мало (несколько уменьшились), однако рост T_i с увеличением L при $L > 3,5$ значительно ускорился и промежуточная зона почти исчезла — горячая зона приблизилась к холодной. Плазмопауза приблизилась к Земле по сравнению с рис. 5 (позиция I, а) примерно на одну L -единицу. Измерения, результаты которых приведены на рис. 5 (позиция I, г), относятся к фазе восстановления — K_p -индексы малы, но внешние L -оболочки еще не заполнились плазмой и L -координата плазмопаузы еще сохраняет величину, соответствующую геомагнитной буре; однако тепловая структура плазмосферы уже изменилась — между холодной и горячей зонами вновь образовалась сравнительно широкая промежуточная область с постепенным повышением T_i .

Рассмотрим в качестве примера еще три последовательных прохождения станции «Прогноз» через дневную плазмосферу — 17, 21 и 25 июня (рис. 5, позиция II). Рис. 5 (позиция II, а) соответствует фазе развития сильнейшей геомагнитной бури ($K_p = 7$, $(\Sigma K_p)_2 = 55$, $(\Sigma K_p)_1 = 36$). Плазмопауза находится примерно на той L -оболочке, по которой на рис. 5 (позиция II, а) проходила внешняя граница холодной зоны ($L = 3,5$). Участок орбиты станции внутри плазмосферы почти полностью проходит между L -оболочками $L = 3,4$ и $L = 3$, лишь на очень коротком отрезке, на высотах $h = 9000 \div 10\,000$ км, выходя в пространство, где $L \approx 3$ (правая часть рис. 5, позиция II, а). На рис. 5 (позиция II, а) можно видеть, что именно в этом интервале высот T_i падает с величин $> 25\,000$ К до ~ 5000 К; граница между холодной и горячей зоной резкая, промежуточная зона практически отсутствует.

На рис. 5 (позиция II, б) 21 июня — фаза восстановления ($K_p = 2_+$) — в начале слабого геомагнитного возмущения, внешняя граница холодной зоны отодвинулась от Земли ($L = 3,3$), внутренняя граница горячей зоны менее резкая (появилась узкая промежуточная зона с постепенным ростом T_i).

Данные рис. 5 (позиция II, в) относятся к 25 июня — более длительному спокойному (слабо возмущенному) периоду. Холодная зона здесь шире, чем в предыдущих случаях (L -координата внешней границы $\sim 4,2$), имеется заметная промежуточная зона ($4,2 < L < 5$). В периферийной части внешней плазмосферы ($L > 5$) горячая зона.

Обсуждение результатов. Как отмечалось выше, измерения показали, что каждую L -оболочку можно считать с точки зре-

ния температуры квазиэквипотенциальной. Поэтому все данные о T_i , в том числе полученные на достаточно высоких геомагнитных широтах (при значительных отношениях L/R_3), по-видимому, можно вдоль силовых трубок привести к плоскости геомагнитного экватора и сравнить с распределениями $T_i(L)$, полученными в [17] на спутнике ОГО-5 вблизи экваториальной плоскости. Такое сравнение показывает, что между данными о T_i , полученными на ОГО-6 и с «Прогноза», имеются некоторые различия, но они не очень велики.

Одно из заметных различий относится к внутренней плазмосфере ($L \leq 3$) — области, в которой плазма сохраняется даже во время сильных геомагнитных возмущений. По данным с «Прогноза» в этой области (названной выше «холодной») величина T_i всегда < 8000 К. По данным [17] T_i в этой зоне часто выше, достигает в ряде случаев нескольких единиц на 10^4 К. Следует, однако, иметь в виду, что данные [17] относятся к 1963 г. — периоду, близкому к максимуму солнечной активности, тогда как данные «Прогноза» — к 1972 г., близкому к минимуму солнечной активности; не исключено, что T_i в плазмосфере зависит от активности Солнца.

При $L < 3$ согласно [17] T_i возрастает с увеличением K_p ; иногда это возрастание является резким или осциллирующим (при $\Sigma K_p > 19$), а иногда постепенным (при $\Sigma K_p < 11$). Так как метод определения T_i по данным «Прогноза», как отмечалось, не чувствителен при $T_i > 25\,000$ К, то при $L > 3$ нельзя провести количественное сопоставление величин T_i , полученных на ОГО-5 и на «Прогнозе», но качественное сходство результатов в этой области имеется. Однако на «Прогнозе» ни разу не наблюдались в области $L > 3$ при увеличении L колебания T_i , приводящие к уменьшению T_i до величин $< 10\,000$ К и зарегистрированные на ОГО-5.

Заметим, что в тех случаях, когда «промежуточная» зона отсутствует, т. е. холодная зона имеет резкую внешнюю границу (рис. 5, позиция I, а и позиция I, б, в), на этой границе не наблюдается существенных особенностей в распределении n_i — это подтверждает, что охлаждение ионов из-за кулоновских взаимодействий на высотах > 4000 км не имеет существенного влияния на температуру ионов в плазмосфере.

Хотя в описанных экспериментах не определялась эффективная электронная температура T_e , но можно полагать, что в зоне высоких T_i значение T_e тоже высоко. Как известно (см., например, [23]), в верхней атмосфере на субавроральных широтах, в зонах, на которые приблизительно проектируется плазмопауза вдоль L -оболочек, наблюдаются стабильные красные дуги (СКД), существование которых можно объяснить повышением T_e . Возможно, что именно рассматриваемая горячая зона во внешней плазмосфере является источником указанных повышений T_e .

Выводы

Измерения концентрации ионов в плазмосфере на станциях «Прогноз» и «Прогноз-2» показали, что вблизи полудня плазмопауза расположена на более высоких L -оболочках, чем вблизи полуночи; для магнитно-спокойных и умеренно возмущенных периодов асимметрия полдень — полночь ΔL_{dp} в среднем составляет 1,6; при сильных геомагнитных возмущениях эта асимметрия уменьшается вплоть до исчезновения.

Причина этого различия в положениях дневной и ночной плазмопаузы может быть связана с различиями в направлении конвективного движения плазмы в дневной и ночной частях магнитосферы, с замедлением конвекции магнитосферной плазмы на дневной стороне за счет высокой проводимости дневной ионосферы и с наличием потоков плазмы, поднимающихся по силовым трубкам из дневной ионосферы и опускающихся из плазмосферы в ионосферу ночью.

Модели распределения крупномасштабных электрических полей в спокойной магнитосфере должны удовлетворять условия существования асимметричной в направлении день — ночь эквипотенциальной поверхности — плазмопаузы, имеющей геометрию, соответствующую данным измерений.

Предварительные результаты определения температуры ионов вдоль участков орбиты станции «Прогноз», проходивших в дневной плазмосфере, показали, что величина T_i в плазмосфере зависит главным образом не от высоты h над поверхностью Земли, а от L -координаты; при существенно различных величинах h , но одинаковых L измеренные величины T_i близки, т. е. для ионов L -оболочки можно считать квазиэквивалентными.

Во внутренней плазмосфере (не теряющей плазму даже во время наиболее сильных магнитосферных бурь, т. е. при $L \leq 3$) величина T_i стабильна и независимо от интенсивности геомагнитных возмущений не превышает 8000 К. Эту зону плазмосферы можно считать холодной.

Во внешней плазмосфере всегда имеется горячая зона с $T \gtrsim 25\,000$ К, примыкающая к плазмопаузе. Во время сильных магнитосферных бурь граница этой зоны весьма резкая и непосредственно примыкает к холодной зоне.

Во время продолжительных магнитно-спокойных периодов холодная зона может расширяться до $L \simeq 4$ и между холодной и горячей зонами может возникнуть промежуточная область, протяженность которой в экваториальной плоскости может достигать радиуса Земли (одной L -единицы). В этой промежуточной зоне величина T_i постепенно повышается при увеличении L от 3000 до 25 000 К.

Ранее в связи с теорией образования стабильных красных дуг рассматривались возможности взаимодействия расширяющейся плазмосферы (в стадии восстановления магнитной бури) и

Для объяснения происхождения СКД механизм нагрева электронов, благодаря которому возникают стабильные красные дуги, связывают с взаимодействием кольцевого тока с плазмосферой, расширяющейся в фазе восстановления магнитосферной бури [24]. Однако, как можно видеть из рис. 5 (позиция II, а), внутренняя граница горячей зоны приближается к Земле в фазе развития бури, когда плазмосфера не расширяется, а уменьшает свои размеры. Поэтому если горячая зона плазмосферы является результатом взаимодействия кольцевого тока и периферийной области плазмосферы, то следует иметь в виду не только вторжение холодной плазмы в зону существования частиц кольцевого тока при расширении плазмосферы в фазе восстановления бури, но и вторжение этих частиц в плазмосферу в фазе развития бури (с соответствующими одновременными процессами взаимодействия частиц и волн и возможным образованием СКД).

Авторы [17] считают, что высокие значения T_i вблизи плазмосферы объясняются тем, что ионы в этой зоне являются временно захваченными в магнитную ловушку частицами с энергиями $\simeq 5$ эВ, принадлежащими к хвосту максвелловского распределения ионосферных ионов. В работе [17] отмечается, что заряженные частицы с энергией $\simeq 0,5$ эВ из-за кулоновского рассеяния попадают в конус потерь во время первого же колебания от точки отражения в другом, тогда как частицы с энергией ~ 5 эВ могут совершать 40 и более колебаний. Именно этот процесс, согласно [17], может обеспечить преобладание протонов со сравнительно высокой энергией при больших значениях L и соответственно высокую эффективность T_i .

В работах [24, 25] рассмотрен механизм нагрева плазмосферных электронов в области, где частицы кольцевого тока вторгаются в плазмосферу. Именно в этой области, как полагают авторы [24, 25], протоны кольцевого тока резонансным образом передают ионно-циклотронным колебаниям в плазмосфере энергию, запасенную в неравновесном (с избытком поперечной энергии частиц) распределении протонов кольцевого тока. В результате рефракции на плазмопаузе эти колебания распространяются под углом к магнитному полю и испытывают линейное затухание Ландау на электронах, что приводит к нагреву плазмосферных электронов [24, 25].

Механизм нагрева плазмосферных ионов был рассмотрен в работе [26]. Согласно этой работе, часть энергии ионно-циклотронных колебаний передается ионам в процессе индуцированного рассеяния этих колебаний на холодных ионах плазмосферы. По оценкам [26], ионы, как правило, греются сильнее, чем электроны, несмотря на малость амплитуды волны нелинейного эффекта рассеяния на ионах.

сформированного кольцевого тока, которое может привести к нагреву внешней плазмосферы. Описанные результаты определения T_i по данным, полученным с «Прогноза», свидетельствуют в пользу того, что нагрев внешней плазмосферы происходит также при уменьшении размеров плазмосферы в процессе формирования кольцевого тока в фазе развития магнитосферной бури (так как внутренняя граница горячей зоны приближается к Земле), т. е. ранее холодная часть плазмосферы нагревается. Можно полагать, что при этом возникают СКД.

Обработка данных, полученных со станции «Прогноз», продолжается — в дальнейшем предполагается оценить T_i в горячей зоне и рассмотреть различие T_i в разных сечениях одной и той же L -оболочки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carpenter D. L.— J. Geophys. Res., 1966, 71, 693.
2. Безруких В. В.— Космические исследования, 1970, 8, вып. 2, 273.
3. Chappel C. R., Harris K. K., Sharp G. W.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 50.
4. Chappel C. R., Harris K. K., Sharp G. W.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 219.
5. Chappel C. R., Harris K. K., Sharp G. W.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 348.
6. Chappel C. R., Harris K. K., Sharp G. W.— J. Geophys. Res., 1971, 76, 3832.
7. Chappel C. R.— Rev. Geophys. Space Phys., 1972, 7, 951.
8. Nishida A.— J. Geophys. Res., 1966, 71, 5669.
9. Brice N. M.— J. Geophys. Res., 1967, 72, 5193.
10. Kavanagh L. D., Freeman J. W., Chen A. J. Jr.— J. Geophys. Res., 1968, 73, 5511.
11. Axford W. J.— Rev. Geophys. Space Phys., 1969, 7, 421.
12. Wolf R. A.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 4677.
13. Грингауз К. И., Безруких В. В., Озеров В. Д., Рыбчинский Р. Е.— ДАН СССР, 1960, 131, 6, 1301.
14. Serbu G. P., Maier E. J. R.— J. Geophys. Res., 1966, 71, 3755.
15. Безруких В. В., Бреус Т. К., Грингауз К. И.— Космические исследования, 1967, 5, вып. 5, 798.
16. Грингауз К. И., Безруких В. В., Бреус Т. К.— Космические исследования, 1967, 5, вып. 2, 245.
17. Serbu G. P., Maier E. J. R.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 6103.
18. Безруких В. В., Волков Г. И., Грингауз К. И., Мокров В. И.— Настоящий сборник, с. 184.
19. Carpenter D. L., Park C. G.— Rev. Geophys. Space Phys., 1973, 11, 133.
20. Park C. G.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 4249.
21. Evans J. V.— Radio Sci., 1971, 7, 609.
22. Banks P. N., Nagy A. F., Axford W. I. Planet. Space Sci., 1971, 19, 1653.
23. Rees M. H., Roble R. G.— Rev. Geophys. Space Phys., 1975, 13, 201.
24. Cornwall J. M., Coronity F. V., Thorne R. M.— J. Geophys. Res., 1971, 76, 4426.
25. Cornwall J. M., Coronity F. V., Thorne R. M.— J. Geophys. Res., 1970, 75, 4699.
26. Galeev A. A. Plasma turbulence in the magnetosphere with special regard to plasma heating.— In: Physics of the hot plasma in the magnetosphere. B. Hultquist, L. Stenflo (Eds). N. Y.— London, Plenum Press, 1975, 251.

ПОЛОЖЕНИЕ И ДВИЖЕНИЕ ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ «ПРОГНОЗ» и «ПРОГНОЗ-2»

Г. Н. Застенкер, М. З. Хохлов, В. С. Мокров

Определение положения околоземной ударной волны проводилось на большом числе космических аппаратов, вышедших за пределы магнитосферы Земли. В частности, длинные ряды наблюдений на спутниках типа ИМП за 1964—1968 гг. были суммированы в работе [1]. В работах [2, 3] рассмотрены более поздние данные, полученные на спутнике «Геос-1» в 1968—1970 гг. Изучение среднего положения ударной волны и вариаций положения относительно этого среднего позволяет рассмотреть ряд особенностей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Как показывает большое число данных, весьма часто наблюдалось движение фронта ударной волны относительно космического аппарата [4—7]. Характер этого движения, однако, еще недостаточно изучен. При различных подходах к его анализу были получены значительные расхождения в оценках скорости указанного движения. Несомненный интерес представляет выявление связи его с изменениями в солнечном ветре.

Регулярное наблюдение околоземной ударной волны проводилось в 1972 г. с помощью различных приборов на высокоапогейных станциях «Прогноз» и «Прогноз-2», имевших сильно вытянутую орбиту [8].

Измерения параметров плазмы на этих станциях проводились с помощью ряда электростатических анализаторов и ловушек заряженных частиц [9, 10]. В настоящей статье использованы результаты измерений с ловушками заряженных частиц. Методика и аппаратура этого эксперимента детально описаны в работе [10].

На каждом витке вокруг Земли обе станции дважды пересекали фронт околоземной ударной волны, положение которого регистрировалось всеми датчиками. Критерием прохождения фронта служило, во-первых, значительное расширение энергетического спектра ионной компоненты плазмы с перемещением максимума спектра в сторону меньших энергий и, во-вторых, значительное увеличение энергии электронов (≥ 70 эВ). Измерения спектров ионов проводились за время 5,5 мин, а интегрального потока частиц (разности полного потока ионов и потока электронов с энергией, большей 70 эВ) — раз в 41 с.

Таким образом, временное разрешение пересечения фронта составляло от 1 до 5 мин, что соответствует пространственному разрешению ~ 100 —500 км. Всего в описываемом эксперименте за период апрель — ноябрь 1972 г. зарегистрировано 124 прохождения станций через ударный фронт, расположенных в дневном