

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

Том XIV

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

МОСКВА • 1974

УДК 523.95

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА СПУТНИКАХ СЕРИИ «ПРОГНОЗ»

*В. В. Безруких, А. П. Беляшин, Г. И. Волков, К. И. Грингауз,
Л. И. Денщикова, Г. Н. Застенкер, В. Г. Капцов, В. Ф. Копылов,
В. С. Мокров, Л. С. Мусатов, Ю. Н. Позднов, А. П. Ремизов,
М. З. Хозлов*

Описаны аппаратура и методика плазменного эксперимента на спутниках «Прогноз», «Прогноз-2» и «Прогноз-3». Приводятся примеры полученных данных и среднесуточные значения потоков ионов солнечного ветра за апрель — август 1972 г.

В числе научных приборов, установленных на высокоапогейных спутниках «Прогноз», «Прогноз-2» и «Прогноз-3», имелись ловушки заряженных частиц нескольких типов (и электростатический анализатор на «Прогноз-3»), предназначенные для длительного изучения солнечного ветра, малоэнергичной плазмы в переходной области, плазмы внутри магнитосферы Земли, включая плазмосферу, и потоков мягких электронов за пределами внешнего радиационного пояса.

Ниже приводятся основные сведения об упомянутых приборах, размещении их на спутниках, а также некоторые примеры полученных результатов и среднесуточные значения потоков ионов солнечного ветра за апрель — август 1972 г.

Спутники серии «Прогноз» имеют сильно вытянутую орбиту с апогеем до 200 000 км и сравнительно низким перигеем, что обеспечивает проведение длительных измерений вне магнитосферы и изучение различных областей внутри нее. В табл. 1 приведены даты запуска всех трех спутников и начальные параметры их орбит.

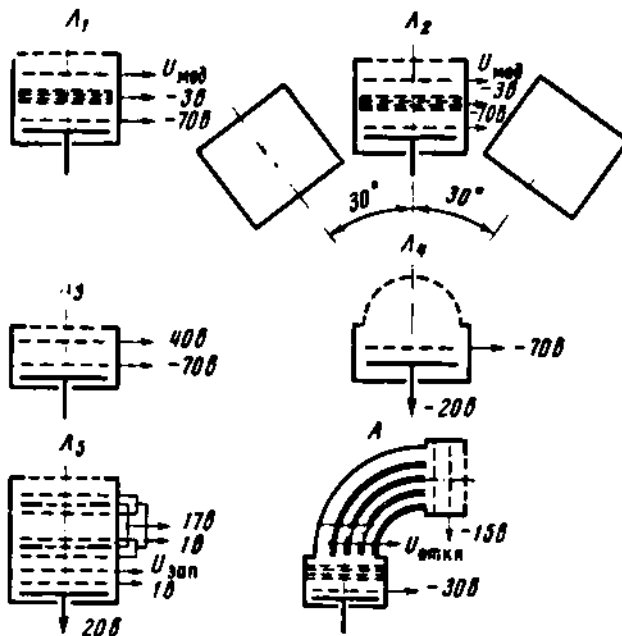
Спутники типа «Прогноз» снабжены системой солнечной ориентации: одна из осей аппарата направлена на Солнце с точностью не хуже $\pm 10^\circ$, а сам аппарат вращается вокруг этой оси с периодом ~ 2 мин.

Ловушки и анализатор заряженных частиц. Каждая ловушка представляет собой систему, состоящую из коллектора и ряда диафрагм и сеток, помещенных в общий металлический корпус. Схемы всех датчиков и величины напряжений на их электродах показаны на фиг. 1.

Таблица 1

Спутник	Дата запуска	Апогей, тыс. км	Перигей, км	Наклонение, град	Период, час
«Прогноз»	14.IV 1972	200,9	940	65	97,0
«Прогноз-2»	29.VI 1972	201,0	557	65	96,9
«Прогноз-3»	15.II 1973	200,2	590	65	96,4

Для определения дифференциального энергетического спектра ионной компоненты плазмы применялись ловушки L_1 или L_2 (фиг. 1). Ловушка L_1 аналогична модуляционной ловушке, использовавшейся на аппаратах «Зонд-2» и «Венера-3» [1, 2], отличаясь от нее некоторыми конструктивными изменениями, несколько улучшающими ее характеристики. Принцип действия этой ловушки состоит в модуляции потока ионов с помощью переменного тормозящего потенциала и регистрации только переменной составляющей коллекторного тока. Это позволяет выделить ток, создаваемый потоком ионов, обладающих энергиями в определенном диапазоне, на



Фиг. 1

фоне значительно большего постоянного тока в цепи коллектора, обусловленного фотоэлектронами и потоком ионов других энергий.

Конструкция и характеристики ловушки детально описаны в [3], а методика обработки ее показаний — в [4]. Каждый экземпляр ловушки проходил также предполетную градуировку совместно с соответствующими электронными блоками путем облучения его в лабораторных условиях широким параллельным пучком ионов.

Ловушка L_2 представляет собой блок из пяти одинаковых электродных систем, полностью идентичных по конструкции электродной системе ловушки L_1 и собранных в одном корпусе. Одна из электродных систем расположена в центре ловушки, а четыре другие расставлены симметрично по вершинам квадрата и оси их наклонены к оси центральной на 30° (фиг. 1, где показаны 3 электродные системы, оси которых лежат в одной плоскости). По принципу устройства ловушка L_1 аналогична блоку модуляционных ловушек, примененному в [5] для изучения солнечного ветра на поверхности Луны. Как показано в [4], использование такого блока позволяет определять углы прихода и, как следствие этого, более точно измерять другие параметры солнечного ветра.

Плоская интегральная ловушка L_4 , предназначена для измерения потоков частиц, энергия которых больше некоторого предела.

В соответствии с указанными на фиг. 1 потенциалами ловушка Л₁ регистрирует разность потоков электронов с $E_e \geq 70$ эв и ионов с $E_i \geq 40$ эв. В частности, ловушка Л₁ позволяет измерять полный поток ионов солнечного ветра, включая частицы, энергия которых выше пределов измерения модуляционной ловушки. Кроме того, ловушка Л₁ позволяет проводить измерение потоков электронов в переходной области, а также измерение мягких электронных потоков за внешней границей радиационного пояса, принадлежащих к «плазменному слою» [6–8].

При ориентации ловушки на Солнце чувствительность интегрального метода ограничена величиной фототока с супрессорной сетки. Проведенные лабораторные измерения [9], как и результат измерений на ряде космических аппаратов, показывают, что величина фототока в ловушках типа Л₁ обычно $(1-2) \cdot 10^{-10}$ а, что эквивалентно плотности потока $\sim 1 \cdot 10^3$ см⁻² сек⁻¹.

Интегральная ловушка Л₂, подобная использованной ранее на спутниках «Электрон-2», «Электрон-4» [10], имеет полусферическую внешнюю сетку (фиг. 1) и предназначена для измерения концентрации тепловых ионов. Она регистрирует поток электронов с $E_e \geq 70$ эв и ионов любых энергий, удовлетворяющих условию $E_i \geq e\phi_{ext}$, где ϕ_{ext} — потенциал спутника относительно окружающей плазмы. Таким образом, сочетание ловушек Л₁ и Л₂ позволяет отделить потоки тепловых ионов от ионов с энергиями $E > 40$ эв. Величина фототока в ловушке Л₂ примерно такая же, как и в ловушке Л₁. Различная ориентация идентичных ловушек типа Л₁ позволяет оценить анизотропию потоков частиц, которая при определенных условиях может быть использована для оценки температуры ионов в плазмосфере [11].

Ловушка Л₃ предназначена для изучения интегрального энергетического спектра электронов, в частности электронов солнечного ветра, в диапазоне от $E_e \geq -e\phi_{ext}$ до 250 эв. Эта ловушка по своей конструкции (фиг. 1) аналогична электронной ловушке, детально описанной в [9], отличаясь от нее наличием специальной управляющей сетки для подачи тормозящего потенциала и тем, что вместо плоского коллектора имеет сотовый, позволяющий снизить коэффициент отражения тепловых электронов от коллектора.

Многослойный цилиндрический электростатический анализатор А предназначен для измерения дифференциального энергетического спектра электронов в диапазоне 0,3–10 кэв [12]. Анализатор представляет собой систему из четырех пар 90-градусных цилиндрических отклоняющих пластин, входных сеток и коллекторного ула, помещенных в металлический корпус (фиг. 1).

Из числа описанных выше датчиков на спутниках «Прогноз» и «Прогноз-2» были установлены ориентированные на Солнце ловушки Л₁, Л₂ и две ловушки типа Л₃, одна в солнечном, а другая в антисолнечном направлениях. На спутнике «Прогноз-3» были установлены ориентированные на Солнце ловушка Л₂, две ловушки типа Л₃, одна в солнечном, другая в антисолнечном направлениях, ловушки типа Л₁ и Л₂, ориентированные в антисолнечном направлении, и анализатор А, нормаль к входному окну которого перпендикулярна оси вращения спутника.

Электронная аппаратура. Электронная часть аппаратуры состоит из трех блоков. Модуляционный блок обеспечивает питающие напряжения для модуляционных усилителей и вырабатывает модуляционное напряжение для ловушки Л₁ (или Л₂), отклоняющее напряжение для анализатора А и запирающее напряжение для ловушки Л₃.

Модуляционное напряжение представляет собой сумму двух напряжений: постоянного, принимающего 8 (на «Прогнозе» и «Прогнозе-2»)

Таблица 2

тип	Датчик		Усилитель	Измеряемые потоки
	эффективная площадь входа, см ²	ширина угловой диаграммы, град	чувствительность, а	
L ₁	17	±47	10 ⁻¹²	10 ⁶ —5·10 ⁶ см ⁻² сек ⁻¹
L ₂	17×5	±77	10 ⁻¹²	10 ⁶ —5·10 ⁶ см ⁻² сек ⁻¹
L ₃	11	±74	3·10 ⁻¹¹	Электроны 2·10 ⁷ —4·10 ⁸ Ионы 2·10 ⁷ —4·10 ⁸ см ⁻² сек ⁻¹
L ₄	11	±80 при E = 1 кэв ±150 при E = 10 эв	3·10 ⁻¹¹	То же
L ₅	6	±30	3·10 ⁻¹¹	3·10 ⁷ —5·10 ⁸ см ⁻² сек ⁻¹
A	20,5	20×40	2,5·10 ⁻¹³	(1,5·10 ⁶ —1·10 ⁸)/E см ⁻² сек ⁻¹ стер ⁻¹ кэв ⁻¹

или 16 (на «Прогнозе-3») фиксированных значений в пределах от 0 до 3 кэ, и переменного прямоугольной формы с частотой 1500 гц, также принимающего 8 или 16 фиксированных значений в пределах от 30 до 950 э. Значения постоянного и переменного напряжений выбраны так, чтобы определяемый энергетический спектр не имел пропусков, т. е. верхняя граница одного энергетического интервала совпадала с нижней границей следующего, и чтобы все интервалы, за исключением первых двух, имели примерно постоянное энергетическое разрешение ($\Delta E/E_{cp} \approx \approx 0,45$ для «Прогноза» и «Прогноза-2» и $\Delta E/E_{cp} \approx 0,25$ для «Прогноза-3»). Первые два интервала, имеющие границы 0—30 и 0—220 эв, предназначены для регистрации частиц низких энергий.

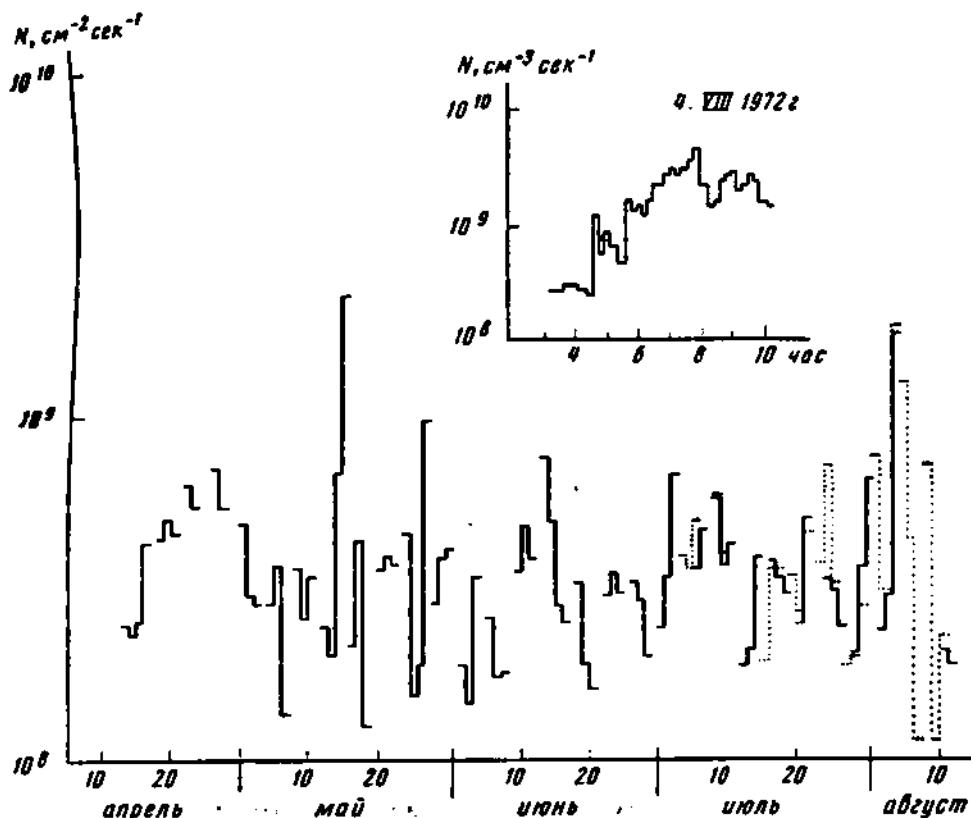
Отклоняющее напряжение, подаваемое на пластины анализатора А, также принимает 16 фиксированных значений расставленных по экспоненциальному закону в диапазоне 40 э ÷ 2,7 кэ. Аналогичным образом запирающее напряжение, подаваемое на управляющую сетку ловушки L₁ для снятия интегрального энергетического спектра электронов, принимает 16 фиксированных значений от 0 до -250 э. В качестве задающего генератора модуляционного блока на «Прогнозе» и «Прогнозе-2» используется кварцевый генератор с частотой 24 кгц и стабильностью не хуже 10⁻³. Эти колебания через делитель частоты (деление на 16) подаются на генератор модуляционного напряжения. На спутнике «Прогноз-3» используется камертонный генератор с частотой 1350 гц. Контрольные уровни, характеризующие величины переменной и постоянной составляющих модуляционного напряжения, в каждом цикле измерений выводятся на телеметрику.

Блок модуляционных усилителей представляет собой один (для «Прогноза» и «Прогноза-2») или 5 (для «Прогноза-3») одинаковых высокочувствительных узкополосных усилителей переменного тока.

Квазирезонансная частотная характеристика усилителя, обеспечивающая малую величину шумов на его входе, получается за счет введения частотно-зависимой отрицательной обратной связи (двойной T-мост), при этом полоса пропускания усилителя составляет ~ 10 гц.

Для проверки стабильности усилителей переменного тока во время полета каждые 6 часов проводится их калибровка. Для этого включается модуляционное напряжение, и на супрессорную сетку ловушки L₁ (или L₂) подается фиксированный переменный сигнал, емкостная наводка от которого на коллектор измеряется усилителем.

Электронный блок для интегральных ловушек (и анализатора) содержит три (для «Прогноза» и «Прогноза-2») или пять (для «Прогноза-3») узкополосных усилителей переменного тока.



Фиг. 2

идентичных усилителей постоянного тока включаемых в коллекторные цепи соответствующих датчиков. Усилители собраны по двухтактной симметричной схеме со 100%-ной отрицательной обратной связью при коэффициенте усиления в петле обратной связи 200÷300. Эта схема обладает высокой стабильностью и позволяет исключить влияние изменений тока накала входных электрометрических ламп на величину их анодного тока. Основные параметры датчиков и усилителей приведены в табл. 2.

Предварительные результаты измерений. Всю совокупность плазменных измерений на спутниках серии «Прогноз», выполненную в ходе описываемого эксперимента, можно разделить на три части.

1. Вне магнитосферы Земли проводилось непрерывное измерение потока солнечного ветра и энергетического спектра ионов. Величина потока может быть, в частности, определена по показаниям интегральных ловушек Л, или Л. Эти ловушки имеют широкую диаграмму направленности, так что небольшие (до 10°) отклонения направления ветра от оси ловушки и не слишком большая температура ионов (не выше 5·10⁶ К) приводят в занижению измеряемого потока не более чем на 10–20%.

С другой стороны, напряжение на супрессорных сетках ловушек Л, Л, составляет –70 в, так что электроны солнечного ветра дают вклад в измеряемый ток, меньший чувствительности прибора.

Весьма существенно для измерения потока ионов по показаниям интегральных ловушек правильное определение величины фототока в ориентированной на Солнце ловушке. В описываемом эксперименте такая оценка может быть сделана по величине тока ловушек Л₁ и Л₂ в тех областях внутри магнитосферы, в которых потоки заряженных частиц заведомо ниже чувствительности прибора.

На фиг. 2 приведены предварительные данные о величине потока ионов солнечного ветра за период с 14.IV по 12.VIII 1972 г. (время московское, сплошная линия — «Прогноз», пунктир — «Прогноз-2»). Эти данные получены по показаниям ловушек Л₁ с учетом сделанных выше оговорок и усреднены по суточным интервалам. Пропуски в кривых соответствуют пребыванию спутника внутри магнитосферы. Обращают на себя внимание весьма большие значения потоков солнечного ветра (среднесуточные значения до $2 \cdot 10^9$ см⁻²сек⁻¹), зарегистрированные при прохождении межпланетных ударных волн 15.V и 4.VIII 1972 г.

На фиг. 2 (врезка) приведен более детально характер нарастания потока ионов солнечного ветра во время прихода к Земле ударной волны 4.VIII 1972 г. (даны 10-минутные средние значения). Показания ловушки Л₁ в этот момент времени свидетельствуют, что скорость солнечного ветра лежит в пределах 550—600 км/сек, так что концентрация протонов превышает 100 ион/см³.

2. На каждом витке вокруг Земли спутники серии «Прогноз» пересекали границы магнитосферы — фронт околоземной ударной волны и магнитопаузу, положение которых регистрировалось всеми датчиками, входившими в состав эксперимента. На фиг. 3 приведен ход ионной компоненты солнечного ветра в различных энергетических интервалах по данным ловушки Л₁ на первом витке спутника «Прогноз» (оцифрованы сутки, время московское). Каждая вертикальная линия соответствует одному спектру, разбитому на 8 энергетических интервалов. Плотность почернения в каждом отрезке пропорциональна логарифму тока ловушки в данном энергетическом интервале в соответствии с приведенной шкалой почернений.

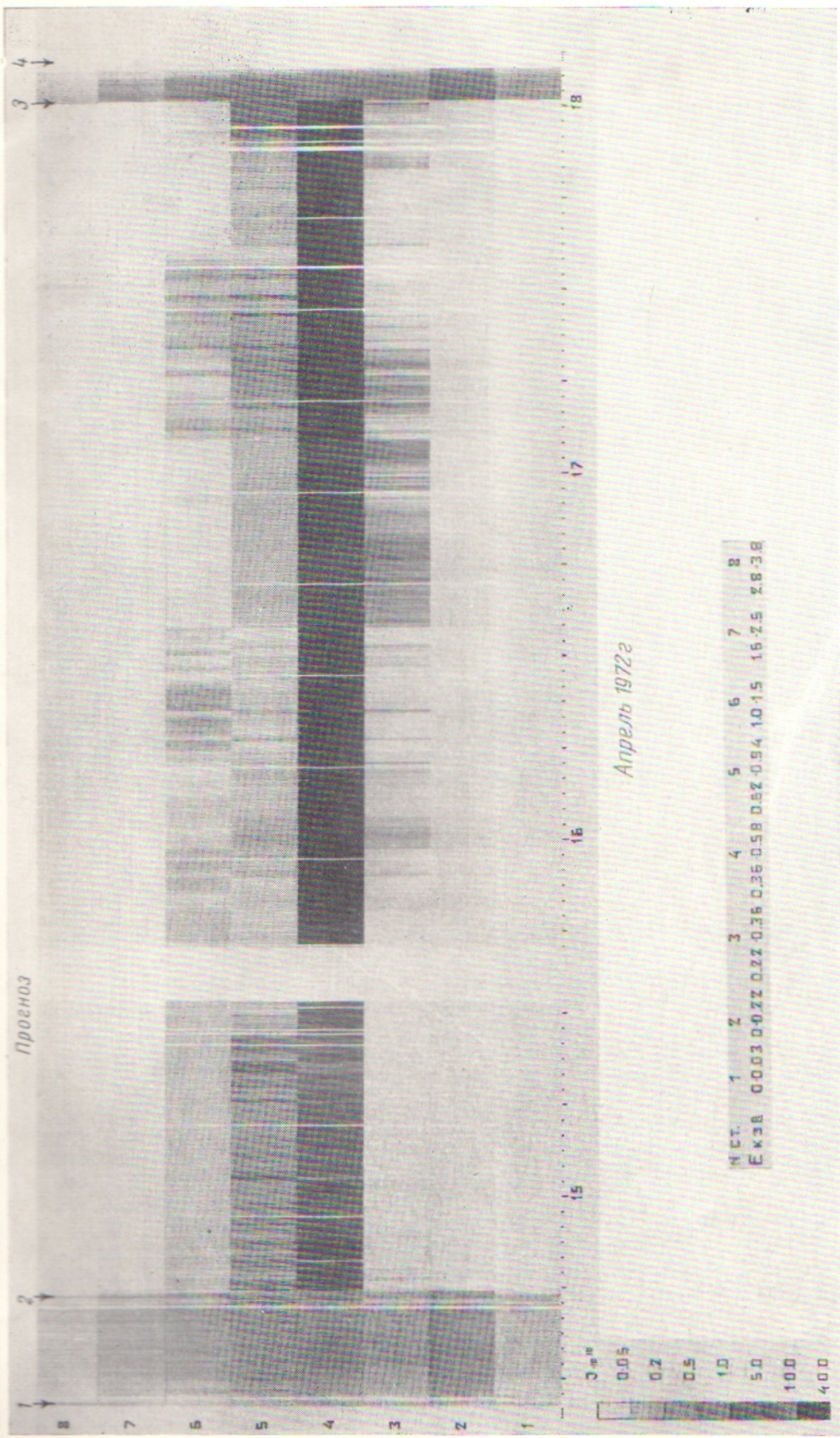
Признаком пересечения аппаратом фронта ударной волны является (см., например, [13]) резкое расширение энергетического спектра ионов с перемещением максимума спектра к энергии ~ 200 эв.

Пересечение магнитопаузы идентифицируется по резкому спаду потока ионов. В соответствии с этими признаками на спектрограмме отчетливо видны отмеченные стрелками пересечение магнитопаузы около 10 час. 14.IV (1), прохождение спутника через переходный слой (с широкими энергетическими спектрами), выход в невозмущенный солнечный ветер в 18 час. 14.IV (2), снова переход через фронт околоземной ударной волны в 0 ч. 30 м. 18.IV (3) и пересечение магнитопаузы в 2 ч. 30 м. 18.IV (4).

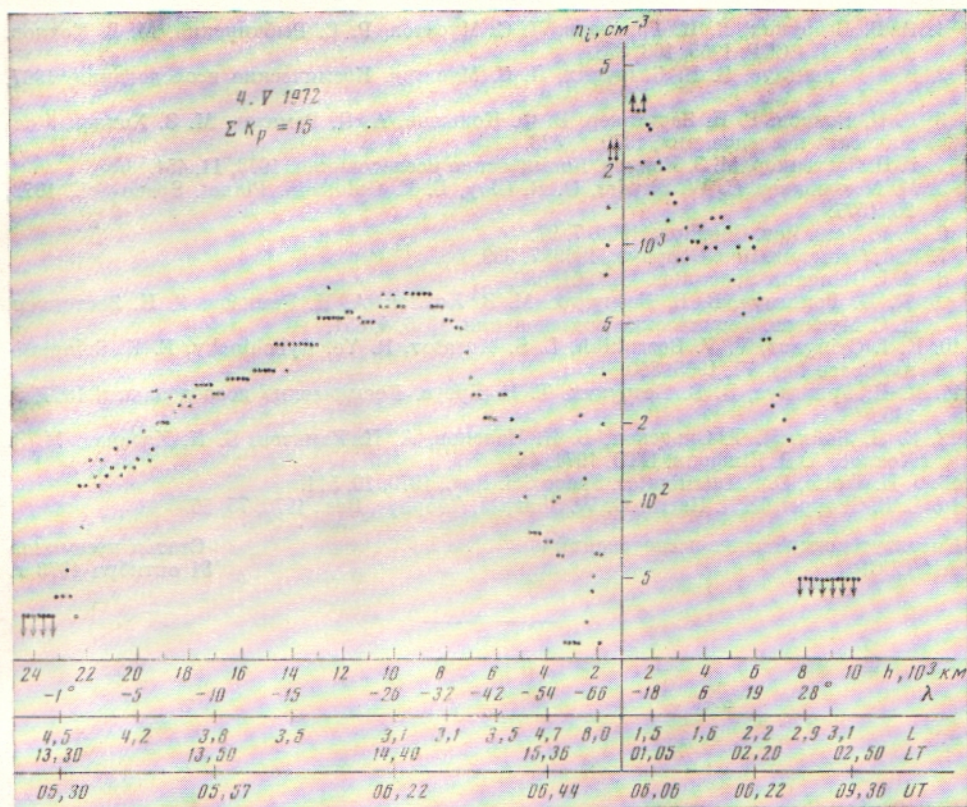
Спектрограмма фиг. 3 позволяет также ориентировочно оценить интенсивность и скорость солнечного ветра. Как видно, в течение почти всего витка максимум спектра в межпланетной среде приходится на интервал 260—340 км/сек.

3. Сравнительно малая высота перигея спутников серии «Прогноз» дает возможность также изучать плазмосферу. В соответствии с приведенной выше чувствительностью по показаниям ловушек можно оценить величину концентрации протонов с энергией ~ 1 эв при скорости спутника 3—5 км/сек (и в предположении неположительного потенциала аппарата) в пределах $(30 \pm 6) \cdot 10^3$ см⁻³.

На фиг. 4 приводится измеренный ход концентрации тепловых протонов в зависимости от высоты h , геомагнитной широты λ , L -координаты,



Фиг. 3



Фиг. 4

местного и мирового времени. Слева от оси ординат приведены результаты измерений на нисходящем участке орбиты, справа — на восходящем.

Как видно из фиг. 4, спутник пересек плазмоспазу (границу плазмосферы) в 5 ч. 30 м. UT на высоте 22 000 км ($L \approx 4,4$). По мере приближения спутника к Земле концентрация ионов растет, достигает на $h = 8000-10\,000$ км максимума и резко падает. Можно полагать, что такое резкое уменьшение концентрации связано с увеличением L -параметра. На $h < 3000$ км, где значение L падает, концентрация протонов возрастает. Приведенные данные, типичные для условий умеренной геомагнитной активности, по-видимому, свидетельствуют о малом изменении концентрации тепловой плазмы вдоль силовых трубок с $3 \leq L \leq 4,6$ от $h \sim 3000$ км до их вершин.

На восходящем участке траектории плазмоспаза была зарегистрирована на $L \approx 3,5$. Асимметрия экваториальной проекции плазмосферы в направлении 3—13 час. LT часто наблюдается по данным ловушек на спутнике «Прогноз» и, по-видимому, согласуется с показаниями масс-спектрометра на спутнике ОГО-5 [14].

Авторы выражают благодарность Г. Г. Каплину за помощь в подготовке эксперимента и В. М. Синицину, проведшему расчет координат спутников.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Безруких, К. И. Грингауз, Л. С. Мусатов, Р. Е. Рыбчинский, М. З. Хохлов. Докл. АН СССР, 1965, 163, 873.
2. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Л. С. Мусатов. Космические исследования, 1967, 5, 251.
3. Г. И. Волков, Г. Н. Застенкер, В. Ф. Копылов, А. П. Ремизов, М. З. Хохлов. Космические исследования, 1970, 8, 423.
4. Г. Н. Застенкер, М. З. Хохлов. Космические исследования, 1973, 11, 451.
5. M. Neugebauer, C. W. Snyder, O. R. Clay, B. E. Goldstein. Planet. Space Sci., 1972, 20, 1577.
6. N. F. Ness. Rev. Geophys., 1969, 7, 97.
7. K. I. Gringauz. Rev. Geophys., 1969, 7, 339.
8. K. I. Gringauz. Space Res. II, 1961, 539.
9. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. З. Хохлов, А. П. Ремизов, Г. Н. Застенкер, Л. С. Мусатов. Космические исследования, 1966, 4, 851.
10. K. I. Gringauz, V. V. Bezrukikh, L. S. Musatov, R. Ye. Rybchinsky, E. K. Solomatina. Space Res. VI, 1965, 850.
11. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус. Космические исследования, 1967, 5, 245.
12. Е. Л. Лейн, Л. Т. Ольдекоп, Б. В. Поленов, А. П. Ремизов, Б. И. Хазапов, М. З. Хохлов, А. В. Шифрил. ПТЭ, 1971, 44.
13. J. H. Wolfe, D. S. Intriligator. Space Sci. Rev., 1970, 10, 511.
14. C. R. Chappel, K. K. Harris, G. W. Sharp. J. Geophys. Res., 1970, 75, 50.

Институт космических исследований
АН СССР

Статья поступила
31 октября 1973 г.