



ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR  
SOVIET GEOPHYSICAL COMMITTEE

*RESULTS OF RESEARCHES  
ON THE INTERNATIONAL GEOPHYSICAL PROJECTS*

MAGNETOSPHERIC  
RESEARCHES

N 10

SOLAR WIND. MAGNETOSPHERIC PLASMA

MOSCOW 1968



МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ  
ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ АКАДЕМИИ НАУК СССР

*РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ ПРОЕКТАМ*

# МАГНИТОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

№ 10

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР. МАГНИТОСФЕРНАЯ ПЛАЗМА

207  
207

МОСКВА 1988

Сборник объединяет результаты ракетно-спутниковых измерений магнитосферной и ионосферной плазмы, выполненных в период МИМ (Международные исследования магнитосферы, 1977-1979), а также результаты советско-чехословацких исследований. Программа МИМ предусматривала одновременные измерения в космосе, ионосфере и на поверхности Земли, так что приведенные результаты могут быть использованы для комплексного анализа ракетно-спутниковых и наземных данных при исследовании системы магнитосфера-ионосфера Земли.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области физики околоземного пространства.

Ответственные редакторы:

доктор технических наук, профессор К. И. Грингауз  
кандидат физико-математических наук В. С. Бассоло

К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин,  
Г. А. Котова, А. П. Ремизов, Е. Г. Ерошенко,  
Ю. В. Минеев, В. Г. Столповский

## ИССЛЕДОВАНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ И ВБЛИЗИ МАГНИТОПАУЗЫ В ПЕРИОД МИМ СО СПУТНИКОВ "ПРОГНОЗ-4", -5", -6"

В период МИМ на спутниках "Прогноз-4" (декабрь 1975 г. - март 1976 г.), "Прогноз-5" (декабрь 1976 г. - май 1977 г.) и "Прогноз-6" (сентябрь 1977 г. - январь 1978 г.) были проведены измерения плазмы при помощи широкоугольных приборов (ИКИ АН СССР), измерения магнитного поля (ИЗМИР АН СССР) и энергичных частиц (НИИЯФ МГУ). Совместный анализ этих измерений проводился с привлечением данных других одновременно работавших космических аппаратов. В обзоре приводятся некоторые результаты измерений плазмы, магнитного поля и энергичных частиц в солнечном ветре и вблизи магнитопаузы и сделанные на их основе выводы. Ранее эти результаты были доложены на различных совещаниях и конференциях по МИМ и опубликованы в отдельных, частью малодоступных изданиях.

Измерение дифференциальных энергетических спектров ионной компоненты плазмы осуществлялось модуляционным методом в 16 энергетических интервалах в диапазоне энергий 0-4 400 эВ. Магнитное поле измерялось при помощи трехкомпонентного феррозондового магнитометра. Измерения энергичных электронов и ионов в диапазоне энергий от десятков кэВ до сотен МэВ проводились при помощи системы телескопов и счетчиков заряженных частиц. Основным периодом опроса на спутниках "Прогноз-4", -5" и -6" составлял 10,24 с. За это время проводились измерения магнитного поля и потоков заряженных частиц при некоторых энергиях. Таким образом, последовательное измерение энергетического спектра ионов солнечного ветра занимало - 2 мин 44 с. Аппаратура, сходная с использовавшейся, описана в [1-5].

Спутники "Прогноз-4", -5" и -6" являлись высококачественными ( ~ 30 R<sub>3</sub> ) с вытянутой орбитой. Один раз за четыре суток пересекая плазмосферу, радиационные пояса, магнитосферу и переходную область, эти спутники выходили в солнечный ветер. На рис.1 в качестве примера приведены несколько орбит спутника "Прогноз-4" в солнечно-геоцентрической системе координат (сэ). Штриховой и штрихпунктирной линиями на этом рисунке показаны, соответственно, положение магнитопаузы и околосолнечной ударной волны. После апогея, приближаясь к Земле на нисходящей части орбиты, спутники "Прогноз-4", -5" и -6" проходили пересеченные выше области околосолнечного пространства в обратном порядке.

На рис.2 приведены результаты измерений потоков энергичных электронов и плазмы, проведенных при приближении "Прогноз-4" к Земле на нисходящей части 14-го витка. Результаты аналогичных измерений, проведенных на восходящей части следующего витка, приведены на рис.3 [6]. Стрелками на этих рисунках показаны моменты прохождения магнитопаузы и ударной волны, определенные, соответственно, по характерному изменению спектров ионной компоненты плазмы (характерное падение переносной скорости) и по значительному уменьшению ионного потока.

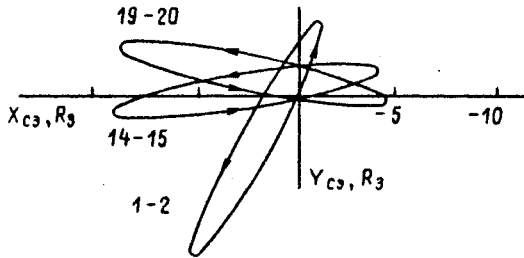
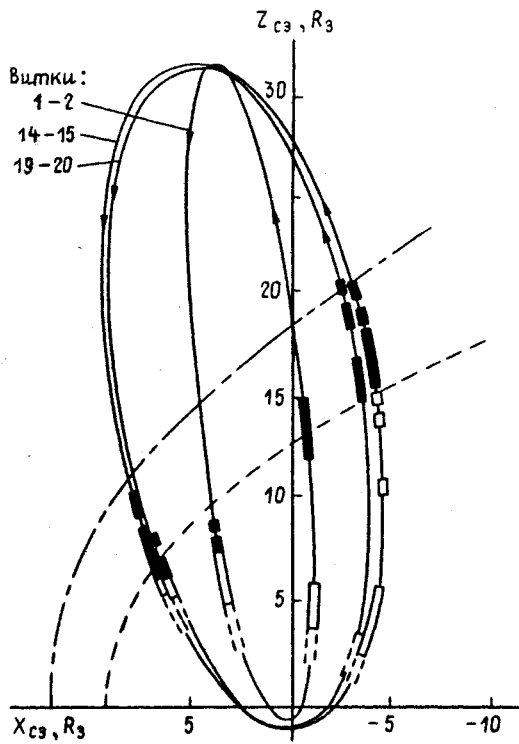


Рис.1. Орбита спутника "Прогноз-4" в солнечно-эклиптической системе координат (СЭ) на нисходящей части 1-, 14- и 19-го витков и на восходящей части 2-, 15-, 20-го витков. На орбитах выделены участки регистрации повышенных потоков энергичных электронов в переходной области (толстая непрерывная линия) и в магнитосфере (двойная линия). Штриховые — положение магнитопаузы, штрихпунктирные — околоземной ударной волны по результатам плазменных измерений на 14-15-м витках

Как можно видеть из рис.2 с дневной стороны, на умеренных широтах потоки электронов с энергией 0,5-0,8 Мэв и 0,8-1,2 Мэв начинают возрастать еще в переходной области, до пересечения магнитопаузы и продолжают увеличиваться при перемещении "Прогноза-4" в глубь магнитосферы, достигая значений выше максимально регистрируемых прибором. В окрестности магнитопаузы потоки электронов этих энергий не испытывают резких изменений.

На более высоких широтах с утренней стороны магнитосферы характер распределения потоков энергичных электронов существенно иной. Здесь в переходной области к магнитопаузе также прилегает слой энергичных электронов (рис.3,а). Однако с внутренней стороны магнитопаузы потоки таких электронов значительно меньше и остаются на низком уровне вплоть до области устойчивого захвата в глубине магнитосферы, где значения электронных потоков превышают предельные для электронного спектрометра.

На спутнике "Прогноз-4" слой энергичных электронов, прилегающий

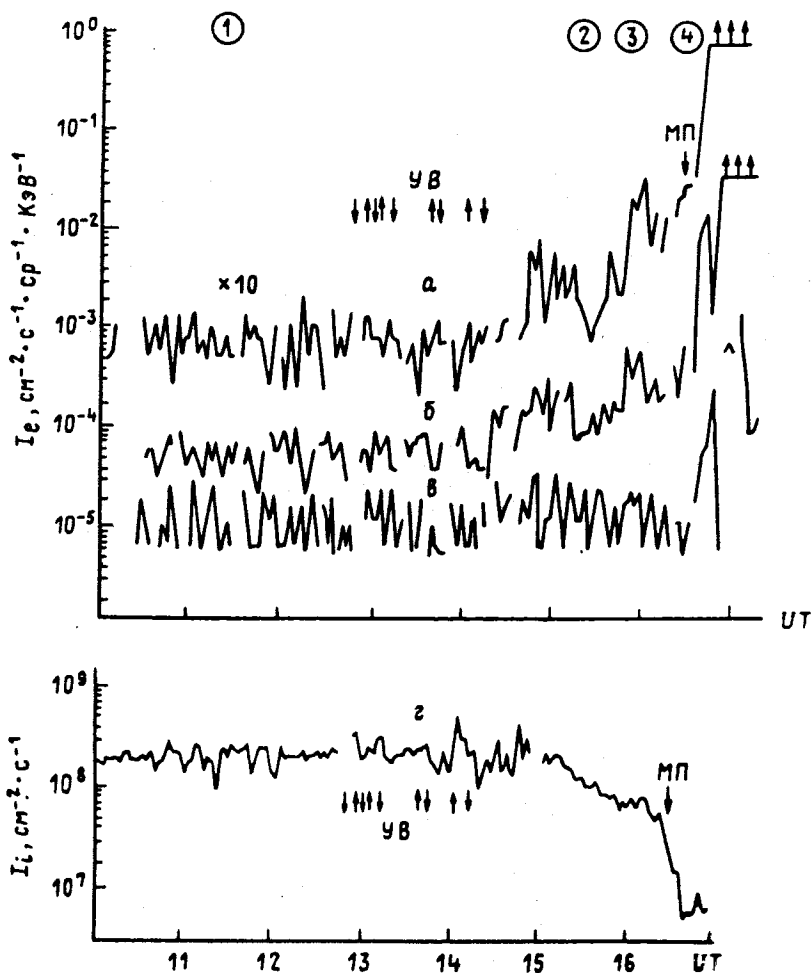


Рис.2. Результаты измерения потоков электронов с энергией 0,5-0,8 МэВ (а); 0,8-1,2 МэВ (б); 2,0-3,0 МэВ (в) и потока волн плазмы 0-4,4 кэВ (г) на нисходящей части 14-го витка спутника "Прогноз-4" 15.02.76. Моменты пересечения спутником магнитопаузы МП (солнечномагнитная широта  $\varphi_{\text{см}} = 45^\circ$ , долготы  $\lambda_{\text{см}} = -10^\circ$ ) и ударной волны УВ показаны по данным кластерных датчиков. Моменты времени измерения спектров энергетических электронов отмечены цифрами в кружках

к магнитопаузе в переходной области, регистрировался при выходе из магнитосферы почти на каждом из 20 витков спутника, за исключением 24.02.76. Кроме слоя энергичных электронов, в переходной области регистрировались кратковременные возрастания (возблески) потоков таких электронов и на значительных удалениях от магнитопаузы. Участки регистрации повышенных потоков энергичных электронов в переходной области и в магнитосфере, по данным измерений на 14-15 витках (рис.2, 3), и аналогичных измерений на некоторых других витках показаны на рис.1. Двойной штриховой линией на этом рисунке отмечены участки траектории спутника, где потоки энергичных электронов превышают максимальные регистрируемые приборами.

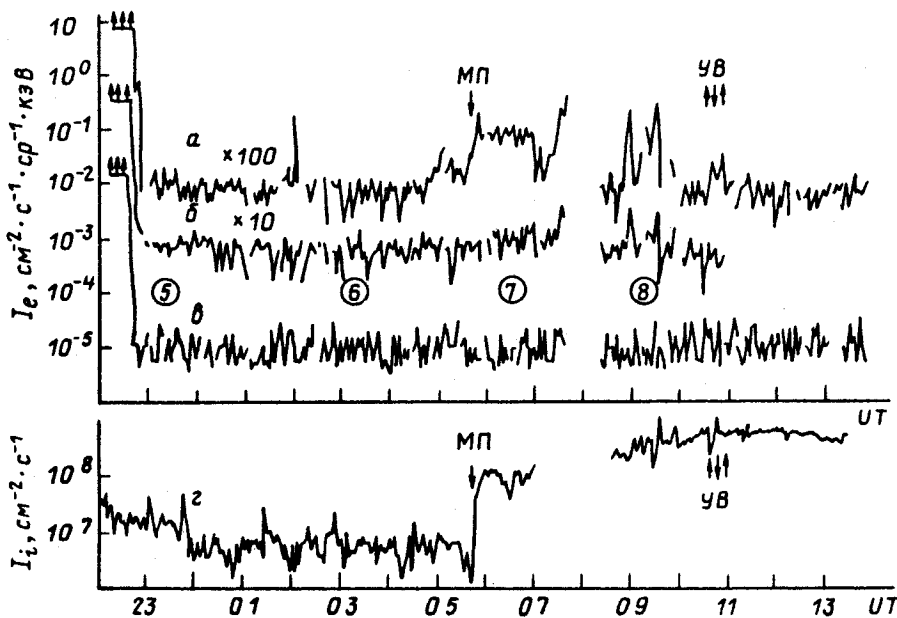


Рис.3. Результаты измерений потоков энергичных электронов и потоков ионов плазмы на спутнике "Прогноз-4" на восходящей части 15-го витка 16.02.76. Обозначения - как на рис.2

$$\varphi_{\text{CM}} = 66^\circ, \lambda_{\text{CM}} = -68^\circ$$

Впервые обратили внимание на существование в переходной области примыкающего к магнитопаузе слоя энергичных электронов Ч.Менг и К.Андерсен [7,8], проанализировавшие измерения потоков электронов с энергией  $E_e \geq 40$  кеВ на спутниках IMP -1, -3 и "Explorer -35". Затем исследования этого образования проводились со спутников "Neos-2" [9-11], "Прогноз-3" [12, 13], "Vela -5", -6" [14], ISEE -1, -2 [15-17], со спутников серии IMP [18-22] и космических аппаратов "Helios -1", -2" [23]. Однако до настоящего времени не существует общепризнанного объяснения образования в переходной области прилегающего к магнитопаузе слоя энергичных электронов.

Предложенные различными авторами механизмы образования слоя можно условно разделить на две группы: механизмы, связанные с ускорением частиц вблизи магнитопаузы (например в результате процессов пересоединения в хвостовой или в лобовой частях магнитопаузы [8, 15, 18-20, 23], процессов взаимодействия частиц с волнами [7, 8], и механизмы, связанные с выходом через магнитопаузу энергичных частиц из внутренних областей магнитосферы (радиационных поясов, плазменного слоя) [12-14, 16, 20].

Особенностью спектральных измерений потоков энергичных электронов в окрестности магнитопаузы, проведенных на спутнике "Прогноз-4" [3, 6, 24, 25], являлось то, что в этом эксперименте измерялись потоки электронов достаточно больших энергий (0,3-3 МеВ). Ранее измерения спектров энергичных электронов вплоть до энергий 1-2 МеВ в окрестности магнитопаузы проводились только на спутниках IMP-8 [20] и ISEE -1, -2 [16]. При этом на ISEE-1, -2 исследовалась низкоширотная магнитопауза а IMP-8 пересекал границу магнито-

сферы в области геомагнитного хвоста. Поэтому измерения спектров энергичных электронов на спутнике "Прогноз-4" с дневной стороны на умеренных солнечно-магнитных широтах ( $35^\circ \leq \varphi_{CM} \leq 50^\circ$ ,  $-30^\circ \leq \lambda_{CM} \leq 30^\circ$  при входе в магнитосферу и с утренней стороны на высоких широтах ( $60^\circ \leq \varphi_{CM} \leq 75^\circ$ ,  $-90^\circ \leq \lambda_{CM} \leq -10^\circ$  при выходе из магнитосферы) дали дополнительную полезную информацию для идентификации источника энергичных электронов в слое.

Отмеченное выше существенное различие поведения электронных потоков в различных областях вблизи магнитопаузы: их возрастание на умеренных широтах с дневной стороны и уменьшение на высоких широтах с утренней стороны при удалении от магнитопаузы в глубь магнитосферы (рис.2, 3) типично и повторяется почти во всех витках спутника "Прогноз-4". Это различие достаточно убедительно свидетельствует в пользу того, что энергичные электроны поступают в расположенный в переходной области слой с дневной стороны магнитосферы, на умеренных (и низких) широтах, а затем по обволакивающим магнитопаузу силовым линиям межпланетного магнитного поля, замороженного в плазму переходной области, растекаются по магнитопаузе и достигают более высоких широт [6].

Такой вывод подтверждается и близостью степенных показателей  $\gamma (dI_e/dE_e \sim E^{-\gamma})$  спектров энергичных электронов в примыкающем к магнитопаузе в переходной области слое и в области псевдозахвата в магнитосфере. Действительно, для спектров энергичных электронов, измеренных в моменты времени 3, 4, 5, 7 (рис.2,3) показатели  $\gamma$  равны, соответственно, 4;4; 3,5 и 3. Спектр электронов этих же энергий в солнечном ветре и магнитосфере существенно жестче и для моментов времени 1, 2 и 6 показатель  $\gamma \approx 1,5-1,7$ . Привлечение любого механизма ускорения электронов вблизи магнитопаузы для объяснения существования слоя энергичных электронов требовало бы такого ускорения электронов, чтобы их спектр оказался подобным спектру электронов внутри магнитосферы, не говоря уже о необходимости ускорения электронов до энергий порядка 1 МэВ.

Еще одно свидетельство в пользу защищаемого здесь механизма образования прилегающего к магнитопаузе слоя энергичных электронов можно получить при анализе причин отсутствия такого слоя при вылете "Прогноза-4" из магнитопаузы 24.02.76. На рис.4 в проекции на плоскость  $U_{CM}Z_{CM}$  солнечно-магнитной системы координат точками показано положение спутника "Прогноз-4" при пересечении им магнитопаузы 26.12.75 (а) и 24.02.76. (б). Сечение магнитопаузы плоскостью, проходящей через эти точки и параллельной плоскости  $U_{CM}Z_{CM}$ , близко к окружности (рис.4). По одновременно измеренному значению межпланетного магнитного поля [26] на рис.4 жирными линиями со стрелками показано его направление. Изгиб магнитных силовых линий на этом рисунке качественно отражает их искривление, возникающее в окрестности магнитопаузы при обтекании магнитосферы солнечным ветром. Как можно видеть из рис.4, если электроны действительно существуют в расположенный в переходной области слой с дневной стороны магнитосферы на умеренных и низких широтах (зазтрихованная на рисунке область) и в дальнейшем растекаются по магнитопаузе вдоль силовых линий обволакивающего ее магнитного поля, то 24.02.76 (рис.4.б) при вылете спутника "Прогноз-4" из магнитосферы и не должен был наблюдаться слой



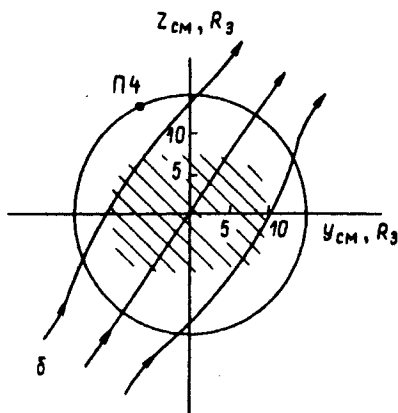
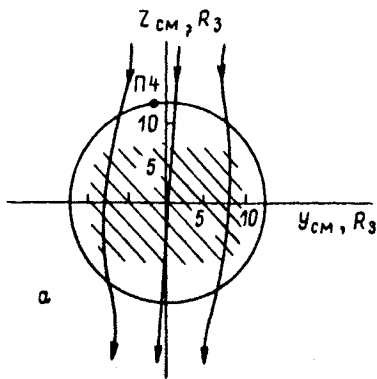


Рис.4. Взаимное положение предполагаемой области выхода энергичных электронов из магнитосферы (штриховка) и спутника "Прогноз-4" при пересечении им магнитопаузы 26.12.75 (а) и 24.02.76 (б), когда, соответственно, наблюдался и не наблюдался примыкающий к магнитопаузе слой энергичных электронов в высоких солнечно-магнитных широтах. Непрерывными линиями со стрелками качественно показано направление обволакивающего магнитосферу межпланетного магнитного поля

энергичных электронов, поскольку в это время место выхода спутника не было связано магнитными силовыми линиями с областью магнитопаузы, являющейся источником энергичных электронов.

Таким образом, проведенные на спутнике "Прогноз-4" измерения позволили сделать вывод, что энергичные электроны с  $E_e \approx 1$  МэВ поступают в прилегающий к магнитопаузе слой на умеренных и низких широтах с дневной стороны магнитосферы и затем по силовым линиям магнитного поля распространяются по поверхности магнитопаузы, образуя тем самым слой энергичных электронов и в других ее частях. В магнитосфере Земли значительные потоки электронов таких энергий существуют только в радиационных поясах, поэтому источником электронов с энергиями  $\approx 1$  МэВ в примыкающем к магнитопаузе слое является, по-видимому, внешний радиационный пояс. Электроны с энергиями порядка десятков кэВ могут поступать в слой и из других источников, например это могут быть ускоренные электроны плазменного слоя [14].

Ранее по данным измерений потоков электронов более низких энергий (65-85 кэВ и 125-165 кэВ), выполненных на спутнике "Прогноз-3" примерно в тех же областях, что и на "Прогнозе-4", также отмечалось различное поведение электронных потоков из высокоширотной и низкоширотной магнитопаузы [13]. Однако при этом увеличение электронных потоков вглубь магнитосферы и отсутствие их изменений на низкоширотной магнитопаузе рассматривалось только как помеха, затрудняющая выделение слоя энергичных электронов в этой области. Проникновение энер-

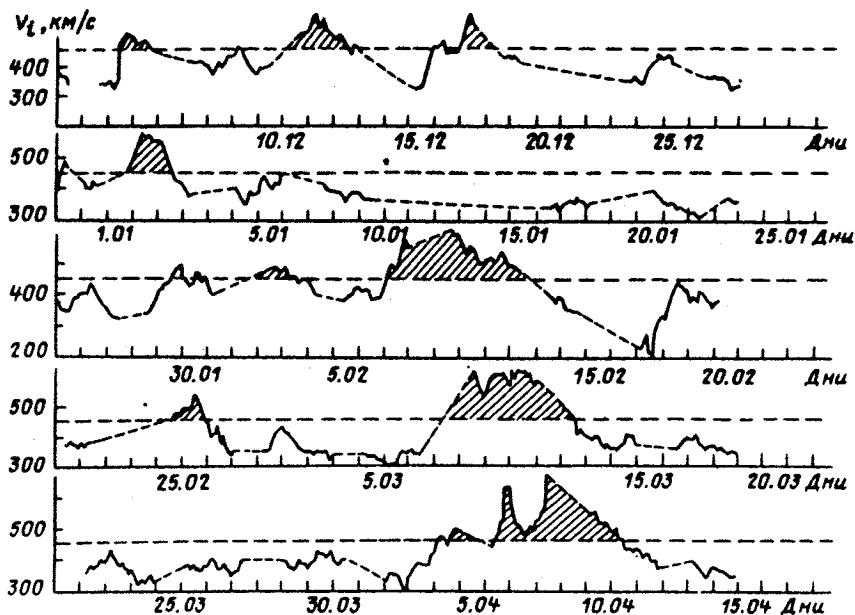


Рис.5. Усредненная по трехчасовым интервалам скорость солнечного ветра  $v_i$  на протяжении пяти последовательных оборотов Солнца ("Прогноз-5", декабрь 1976-апрель 1977 г.). Высоко-скоростные потоки выделены штриховкой, штриховая линия - интер-поляция

гичных электронов и ионов в переходную область через дневную магнитопаузу на более низких, чем у "Прогноза-4", широтах подробно исследовалось в работах [16,17,27] на основе измерений трехмерных функций распределения энергичных заряженных частиц.

Происхождение нерегулярных всплесков потоков энергичных электронов, регистрируемых в переходной области и реже - в солнечном ветре также может быть понято на основе обсуждавшихся выше представлений. Энергетический спектр электронов во всплесках аналогичен спектру электронов в слое вблизи магнитопаузы (например для моментов времени 7 и 8 на рис.3 показатели  $\gamma$  близки и составляют, соответственно, 3 и 3,2). В работах [21,22] показано, что такие всплески наблюдаются преимущественно на силовых линиях межпланетного магнитного поля, проходящих через слой энергичных электронов вблизи магнитопаузы и, следовательно, этот слой является источником энергичных частиц во всплесках.

Ниже рассмотрены результаты измерений вне магнитосферы и переходной области. Эти измерения проводились в фазе минимума 20-го цикла солнечной активности ("Прогноз-4", -5") и в начальной стадии фазы роста 21-го цикла ("Прогноз-6"). К моменту запуска этих спутников измерения солнечного ветра не охватывали целиком даже одного 20-го цикла солнечной активности и на протяжении большей части этого цикла долгопериодические изменения всех параметров солнечного ветра были на удивление малы. Только с появлением на фазе спада 20-го цикла двух мощных высокоскоростных потоков (за период вращения Сол-

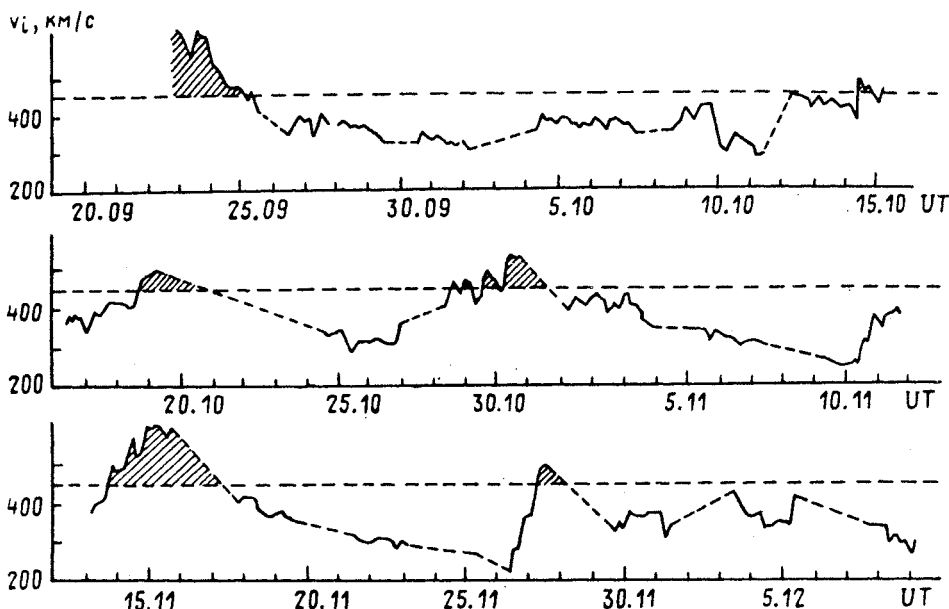


Рис.6. То же, что и на рис.5, по данным спутника "Прогноз-6" октябрь-декабрь 1977 г.

нда), сохранявшихся на протяжении многих солнечных оборотов, стало ясно, что свойства солнечного ветра подвержены долгопериодическим вариациям [28,29]. Именно эти высокоскоростные потоки привели к росту средней скорости солнечного ветра до  $\sim 550$  км/с в 1973-1975 гг. по сравнению с ранее наблюдавшимися типичными значениями ( $\sim 430$  км/с) [30].

Однако к концу 1976 г. (минимум солнечной активности) структура солнечного ветра изменилась: вместо двух стабильных и широких высокоскоростных потоков на протяжении оборота Солнца стало наблюдаться много мелких и нерегулярных потоков (рис.5). Штриховкой на рис.5 отмечены интервалы времени, соответствующие высокоскоростным потокам в солнечном ветре ( $v_i > 450$  км/с). Хотя выделенные потоки и имеют тенденцию к повторению с периодом около 27 дней, однако за это время они претерпевают существенные изменения [31]. Из приведенных на рис.5 данных очевидно, что средняя скорость солнечного ветра к минимуму солнечной активности существенно упала и составляла не более 450 км/с.

На рис.6 приведены значения переносной скорости солнечного ветра, усредненные по трехчасовым интервалам времени, на протяжении трех последовательных оборотов Солнца по данным спутника "Прогноз-6" [32]. Как можно видеть из представленных на этом рисунке данных, несмотря на быстрый рост солнечной активности в конце 1977 г., структура высокоскоростных потоков солнечного ветра оставалась в значительной степени нерегулярной. Средняя скорость солнечного ветра, как и в минимуме солнечной активности, была невелика и не превышала 450 км/с.

По современным представлениям (см., например, [33]) изменение параметров солнечного ветра, регистрируемого на орбите Земли, в цикле солнечной активности связано с перестройкой в этом цикле крупно-

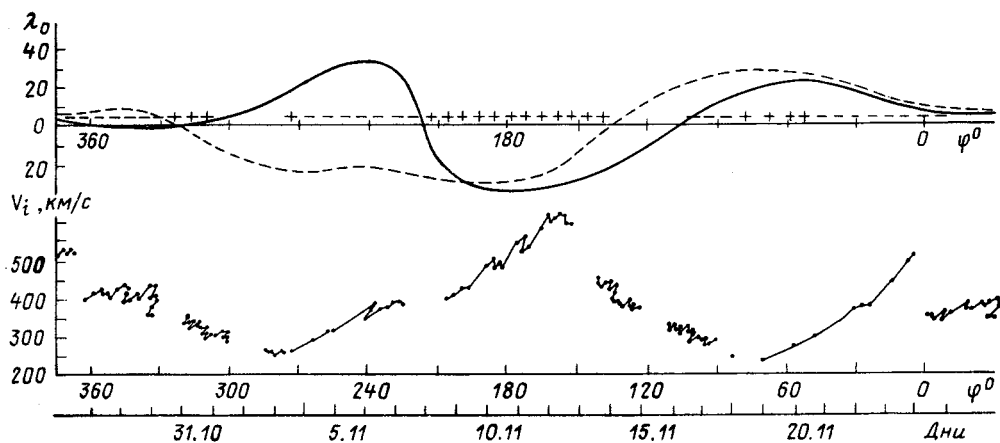


Рис. 7. Сравнение результатов измерения скорости солнечного ветра  $v_i$  на спутнике "Прогноз-6" с положением межпланетного токового слоя, определенного по наземным наблюдениям солнечной короны (штриховая кривая) и по измерениям фотосферного поля (непрерывная)

масштабного магнитного поля Солнца. Источником высокоскоростных потоков солнечного ветра являются корональные дыры [34]. Расположенные между ними низкоскоростные потоки связаны с областью шлемовидных стримеров (опахальных лучей) в солнечной короне [35-37]. Внутри области низкоскоростных потоков в межпланетном пространстве расположен гелиосферный токовый слой, разделяющий высокоскоростные потоки с противоположными направлениями магнитного поля. Проекция пояса корональных стримеров и гелиосферного токового слоя на сферу 1 а.е. представляют собой сложные (вообще говоря, неодносвязные) нестационарные кривые. На спаде солнечной активности пояс корональных стримеров и гелиосферный токовый слой значительно отклоняются от плоскости солнечного экватора и плоскости эклиптики. На расстоянии 1 а.е. спутники в этот период проводят мало времени в окрестности межпланетного токового слоя, большей частью регистрируя устойчивые высокоскоростные потоки ( $v_i \approx 700-800$  км/с) из полярных корональных дыр, достигающих экватора в некотором интервале гелиографических долгот. В период минимума и на начальной фазе роста солнечной активности гелиосферный токовый слой ограничен более низкими широтами, что приводит к снижению средних скоростей солнечного ветра, регистрируемого на орбите Земли (рис. 5, 6).

Для 1660-го и 1661-го кэррингтоновских оборотов Солнца в начальной стадии фазы роста солнечной активности представлялось возможным сравнить результаты измерений солнечного ветра на спутнике "Прогноз-6" с положением межпланетного токового слоя, определенного двумя различными методами. Результаты такого сравнения для 1661-го оборота приведены на рис. 7. В нижней части этого рисунка показаны усредненная по трехчасовым интервалам времени скорость солнечного ветра  $v_i$  по данным спутника "Прогноз-6" в зависимости от гелиографической долготы  $\varphi_0$  области, являющейся источником солнечного ветра

с данной скоростью (в кинематическом приближении). На второй горизонтальной шкале рис.7 приведено также время прохождения области с гелиодолготой  $\varphi_0$  через центральный меридиан Солнца.

Непрерывной жирной линией в верхней части рис.7 показана гелиографическая широта  $\lambda_0$  межпланетного токового слоя, определенная по расчетам в потенциальном приближении до поверхности источников на расстояние  $\approx 2,5$  радиуса Солнца [38]. В качестве нижних граничных условий для этих расчетов брались результаты измерений на Стэнфордской обсерватории компоненты вдоль луча зрения фотосферного магнитного поля. Штриховой линией на рис.7 показано положение токового слоя, определенное в работе [39] по наземным синоптическим наблюдениям солнечной короны на гелиоцентрическом расстоянии  $\approx 1,5$  солнечных радиуса. В рассматриваемый период времени по данным обоих методов гелиосферный токовый слой располагался в низких широтах ( $\pm 30^\circ$ ), однако в интервале гелиодолгот  $220-300^\circ$  расхождение широт токового слоя велико и достигает  $\approx 50^\circ$ .

Аналогичное расхождение положений токового слоя по данным обоих методов в этой же области гелиодолгот существует и на 1660-м обороте Солнца. По-видимому, отмеченное расхождение связано с недостаточно надежным определением положения токового слоя по синоптическим наблюдениям солнечной короны только на малых расстояниях от поверхности Солнца (см. [39]). Действительно, из приведенных на рис.7 данных измерения межпланетного магнитного поля (ММП) на орбите Земли видно несколько лучшее согласие с ними положения токового слоя, определенное в работе [38] (непрерывная кривая): при измерениях под гелиосферным токовым слоем ММП направлено в основном "к Солнцу" (-), а при измерениях над токовым слоем - "от Солнца" (+). Знаки, показывающие направление ММП, на рис.7 нанесены вдоль проекции Земли на поверхность Солнца и отнесены к гелиоширотам, рассчитанным в кинематическом приближении с учетом времени распространения солнечного ветра на расстояние 1 а.е.

Сравнивая результаты измерений скорости солнечного ветра на спутнике "Прогноз-6" (рис.7) с положением межпланетного токового слоя [38], можно видеть, что на 1661-м обороте Солнца наибольшая скорость солнечного ветра была зарегистрирована в области гелиодолгот  $140-200^\circ$ , т.е. при наибольших угловых удалениях ( $\lambda \approx 40^\circ$ ) спутника от межпланетного токового слоя. Значение  $v_i \approx 600$  км/с при  $\lambda \approx 40^\circ$  вполне соответствует полученной в работе [40] для периода минимума солнечной активности (май 1976- август 1977 гг.) эмпирической формуле  $v_i$  (км/с) =  $408 + 473 \sin^2 \lambda$ . Однако рост солнечной активности в период проведения измерений на "Прогноз-6" и связанное с этим увеличение числа транзиентов в солнечном ветре (порожденных вспышками и другими нестационарными процессами на Солнце) часто приводят к значительному увеличению  $v_i$  по сравнению с ожидаемыми при малых значениях  $\lambda$ . Например, большие скорости солнечного ветра, регистрируемые в окрестности гелиодолгот  $\varphi_0 \approx 360^\circ$  и  $\approx 0^\circ$  (рис.7), связаны, соответственно, с приходом межпланетной ударной волны невыясненного происхождения, отмеченной спутниками "Прогноз-6", ISEE-1 и ISEE-2 [32,41,42], и с событиями в солнечном ветре после вспышки балла 2В в области (N 24, W 40) происшедшей 22.11.77, в 9.46 UT [43].

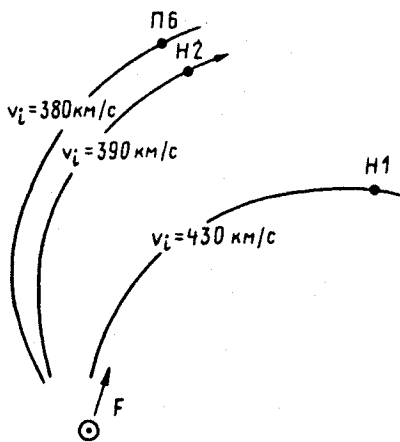


Рис.8. Положение спутника "Прогноз-6" (П6) и космических аппаратов "Helios-1" (Н1) и "Helios-2" (Н2) в момент солнечной вспышки F 01.01.78 г. Силовые линии межпланетного магнитного поля показаны в соответствии с результатами измерений  $v_i$  на этих объектах

Вообще за время проведения измерений на спутнике "Прогноз-6" было зарегистрировано 6 межпланетных ударных волн, из которых 3 удалось связать с солнечными вспышками. Кроме ударной волны, вызванной отмеченной выше вспышкой, 14.10.77 в 11.51 UT была зарегистрирована межпланетная ударная волна от вспышки балла 1В 12.10.77 в 01.50 UT в области (N 06, W 02) и 3.01.78 г. в 20.49 UT была зарегистрирована межпланетная ударная волна, вызванная вспышкой балла 2N в области (S 21, E 06), происшедшей 01.01.78 в 21.45 UT. Межпланетная ударная волна от последней вспышки была также отмечена космическими аппаратами "Helios-1" и "Helios-2", соответственно, в 8.39 UT и в 14.49 UT 03.01.78 г. [32,44,45].

На рис.8 показано положение спутника "Прогноз-6" и космических аппаратов "Helios-1" и "Helios-2" в момент вспышки F. С точностью до 0,05 а.е. все объекты в это время находились на одном и том же гелиоцентрическом расстоянии. На рис.9 представлены часовые средние значения концентрации протонов солнечного ветра 2-4.01.78 г. по данным "Helios-1" (а), "Helios-2" (б), "Прогноз-6" и IMP-1 (д). Использование результатов плазменных измерений, выполненных на IMP-1 [46] и "Прогнозе-6", находящихся на одной и той же гелиодолготе, позволяют получить более полное покрытие исследуемого интервала времени. По данным "Helios-1" (б) и "Helios-2" (г) на рис.8 приведено также содержание  $\alpha$ -частиц. После прохождения фронта ударной волны S через космические аппараты и связанного с этим роста концентрации и протонов, эта величина быстро достигла первого максимума на всех трех космических аппаратах. Однако на "Helios-1" второй (и главный) максимум  $n_i$  наблюдался сразу же за первым (рис.8,а), тогда как на "Прогнозе-6" и "Helios-2" второе, но меньшее возрастание  $n_i$  наблюдалось через 15-16 ч после фронта межпланетной ударной волны (рис.8 в,д).

За вторым возрастанием  $n_i$  на "Helios-1" и "Helios-2" наблюдалась плазма с повышенным содержанием  $\alpha$ -частиц (рис.8 б,г). Кроме того, рост содержания  $\alpha$ -частиц сопровождался значительными флуктуациями направления ММП, указывающими на присутствие некоторой "границы" между плазмой непосредственно за ударной волной и обо-

гащенной  $\alpha$ -частицами областью солнечного ветра. При анализе топологии магнитного поля в этот период времени в работе [46] было показано, что эта "граница" является передней частью магнитного облака или магнитной петли, в которой наблюдаемое магнитное поле вращается в одной плоскости.

Другое заключение о динамике потока за межпланетной ударной волной 03.01.78 можно сделать на основе МГД-моделирования распространения ударных волн в межпланетной среде. В работе [47] показано, что такой поток часто характеризуется "сверхрасширением", сопровождающимся заметным падением плотности и температуры плазмы. При этом ближе к Солнцу межпланетная ударная волна может находиться под воздействием магнитного облака, где оно движется быстрее, в то время как дальше от Солнца ударная волна может быть отделена от магнитного облака [46]. Анализируя приведенные на рис.8 данные, можно предположить, что в месте нахождения "Helios-1" магнитное облако все еще воздействует на межпланетную ударную волну, так как оно примыкает к ее фронту (поршневая ударная волна), тогда как в месте нахождения "Прогноза-6" и "Helios-1" ударная волна заметно отделена (примерно на 0.15 а.е.) от магнитного облака и не находится под его воздействием (взрывная ударная волна). Однако в нашем случае все три космических аппарата были равноудалены от Солнца и, следовательно, наблюдавшийся на них различный характер межпланетной ударной волны связан не с ее изменением при распространении в межпланетном пространстве, а с различным положением мест наблюдения ударной волны по отношению к месту вспышки [32,45].

Ранее о различном в разных направлениях характере ударной волны, генерированной одной и той же вспышкой, по данным комплексных измерений на нескольких космических аппаратах (расположенных, правда, на различных гелиоцентрических расстояниях) сообщалось, например, в [43]. Поскольку в зависимости от положения места наблюдения по отношению к месту вспышки, генерированная ей ударная волна может быть взрывной или поршневой, в свою очередь мы можем сделать вывод, что классификацию межпланетных ударных волн на взрывные и поршневые не следует использовать для каких-либо заключений о свойствах их источника. Этот вывод не согласуется с распространенными представлениями (см., например, [48]) о том, что поршневые межпланетные ударные волны должны быть связаны со вспышками, которые передают энергию и массу солнечному ветру в течение времени, превышающего  $\approx 5$  ч, тогда как межпланетные взрывные волны должны быть связаны со вспышками, которые высвобождают энергию (и, возможно, массу) в течение времени менее  $\approx 0,5$  ч.

Рассмотрим теперь некоторые особенности распространения в межпланетном пространстве энергичных протонов, генерированных во время вспышки 01.01.78. Быстрый рост потока энергичных протонов, отмеченный на "Helios-1" объясняется тем, что во время вспышки F этот космический аппарат находился на силовых линиях межпланетного магнитного поля, соединяющих его с областью, где вспышка произошла (рис.8). Эта и другие особенности распространения энергичных частиц в целом описываются построенной в работе [49] моделью, рассматривающей диффузию космических лучей в солнечной короне и в межпланетном пространстве. Однако смоделированная в [49] зависимость потока энергичных

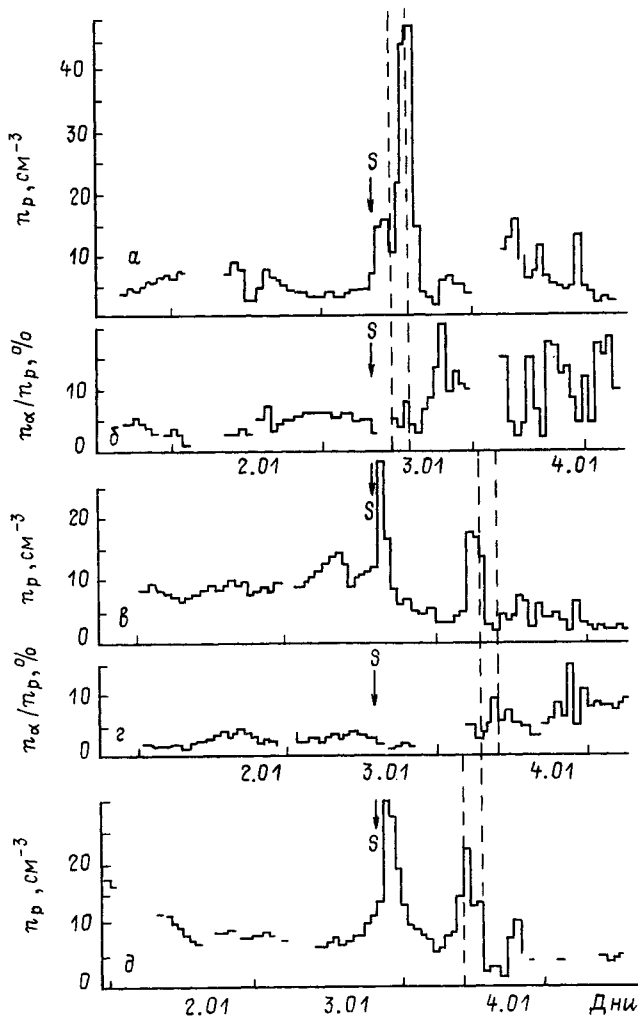


Рис.9. Концентрация протонов солнечного ветра  $n_p$  и содержание  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$ , усредненные по часовым интервалам времени по данным "Helios-1" (а,б), "Helios-2" (в, г), "Прогноз-6" и "IMP-1" (д). S - положение фронта межпланетной ударной волны. Штрихами отмечены интервалы времени, когда наблюдалось резкое падение потока энергичных частиц

ионов от времени  $I_m(t)$  отличается от наблюдавшейся в эксперименте зависимости  $I_i(t)$ . Как можно видеть из приведенного на рис.10 отношения  $I_i/I_m$ , в окрестности фронта межпланетной ударной волны S существует избыток энергичных частиц, отмеченный всеми тремя космическими аппаратами: "Прогнозом-6" (а), "Helios-2" (б) и "Helios-1" (в).

Возрастание потока энергичных частиц перед приходом межпланетной ударной волны S, по-видимому, может быть объяснено как результат увеличения энергии этих частиц при последовательных отражениях от движущегося фронта ударной волны и обратных рассеяниях в области пе-



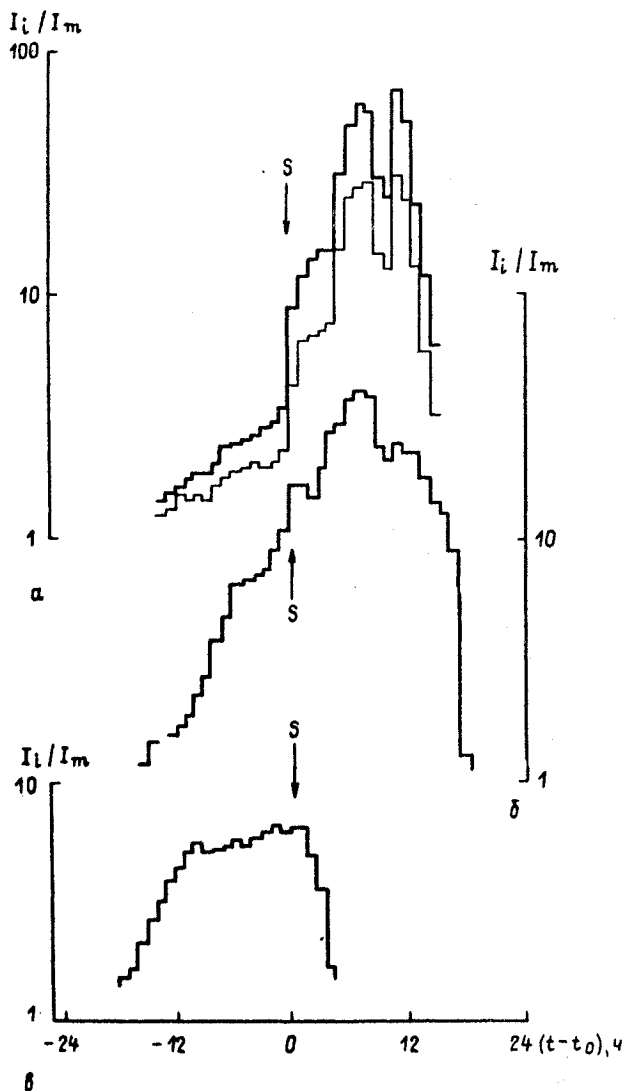


Рис.10. Отношение наблюдавшегося потока энергичных ионов  $I_i$  к потоку ионов  $I_m$  согласно модельным расчетам [49] по данным спутника "Прогноз-6" (а, 2-7 МэВ - жирная ломаная, 7-12 МэВ - тонкая, " Helios-2 " - 2" (б, 4-13 МэВ) и " Helios-2 " - 1" (в, 4-13 МэВ) в окрестности фронта межпланетной ударной волны S, наблюдавшейся на этих объектах 03.01.78

ред фронтом (ускорение Ферми первого рода [50]). Действительно, продолжительность наблюдения области крупных поперечных флуктуаций магнитного поля на " Helios-1 " примерно в 2,1 раза больше продолжительности наблюдения области крупных поперечных флуктуаций на " Helios-2 " (рис.7, а в [45]). В таком же отношении ( $\approx 2$ ) находится продолжительность во времени событий в энергичных частицах (падение интенсивности в  $1/e$  раз) до фронта (рис.10, б, в).

Остановимся теперь на поведении энергичных частиц за фронтом ударной волны. Как можно видеть из рис.10, интенсивность потоков энергич-

ных ионов после фронта ударной волны на "Прогноз-6" и "Helios-2" на порядок выше, чем на "Helios-1". В [45] показано, что это различие связано с менее сильным уменьшением коэффициента диффузии энергичных частиц на фронте ударной волны в случае "Helios-1", в частности, вследствие того, что увеличение на  $S$  как крупных поперечных, так и продольных флуктуаций межпланетного магнитного поля (на гирочастоте энергичных протонов с учетом доплеровского сдвига) в случае "Helios-1" существенно меньше.

В то же самое время, возрастание уровня флуктуаций межпланетного магнитного поля за фронтом ударной волны приводит к дополнительному ускорению энергичных частиц в этой области при их взаимодействии с беспорядочными альвеновскими и звуковыми волнами (ускорение Ферми второго рода [51]). Анализируя спектры энергичных протонов с  $E_p > 0,5$  МэВ за фронтом ударной волны 03.01.78, можно показать, что степенной спектр этих частиц до  $S$  становится круче после прохождения фронта и преобразуется в экспоненциальный [45]. В соответствии с результатами работы [51] это является общей особенностью процессов ускорения частиц волновыми полями.

Примерно через 4 ч после прохождения фронта межпланетной ударной волны через место нахождения "Helios-1" (рис.10,в) и через 14-18 ч после прохождения  $S$  через место нахождения "Прогноза-6" и "Helios-2" (рис.10,а,б) на всех космических аппаратах регистрируется резкий спад потока энергичных протонов. Интервал времени, на котором наблюдается спад потока энергичных протонов, отмечен на рис.9 вертикальными штриховыми линиями. Как можно видеть из этого рисунка, спад потока протонов наблюдается в окрестности границы обогащенной  $\alpha$ -частицами плазмы всплещного происхождения и, по-видимому, связан с взаимодействием таких протонов с передней частью магнитного облака.

Кроме возрастаний интенсивности потоков энергичных частиц до и после фронта межпланетной ударной волны, в экспериментальных данных, полученных на "Прогнозе-6" и "Helios-1", "2", можно видеть и кратковременное возрастание потоков этих частиц, связанное непосредственно с прохождением фронта (shock-spike). Этот эффект отчетливо виден на приведенных на рис.11 профилях потоков энергичных частиц, построенных с временным разрешением 5-10 мин. Ускорение энергичных частиц в окрестности фронта ударной волны происходит вследствие их дрейфа в неоднородном магнитном поле в окрестности  $S$  приводящего в присутствии электрического поля  $-1/c [\vec{v}_i, \vec{B}]$  к увеличению энергии заряженных частиц при благоприятных условиях в несколько раз [51,52]. Эффективность такого механизма ускорения критическим образом зависит от угла  $\beta$  между направлением магнитного поля до  $S$  и поверхностью фронта межпланетной ударной волны. Для углов  $\beta \geq 10^\circ$  увеличение энергии частиц в окрестности  $S$  мало и не следует ожидать изменений потоков энергичных частиц вследствие ускорения в этой области [52]. Используя результаты измерения магнитного поля и плазмы на космических аппаратах "Прогноз-6" и "Helios-1" "2" можно показать, что в местах нахождения всех этих аппаратов при прохождении  $S$  значения угла  $\beta$  были заведомо больше  $10^\circ$  [32,45].

Однако численные расчеты в работе [52] проводились в предположении тонкого и плоского фронта ударной волны. Качественный учет

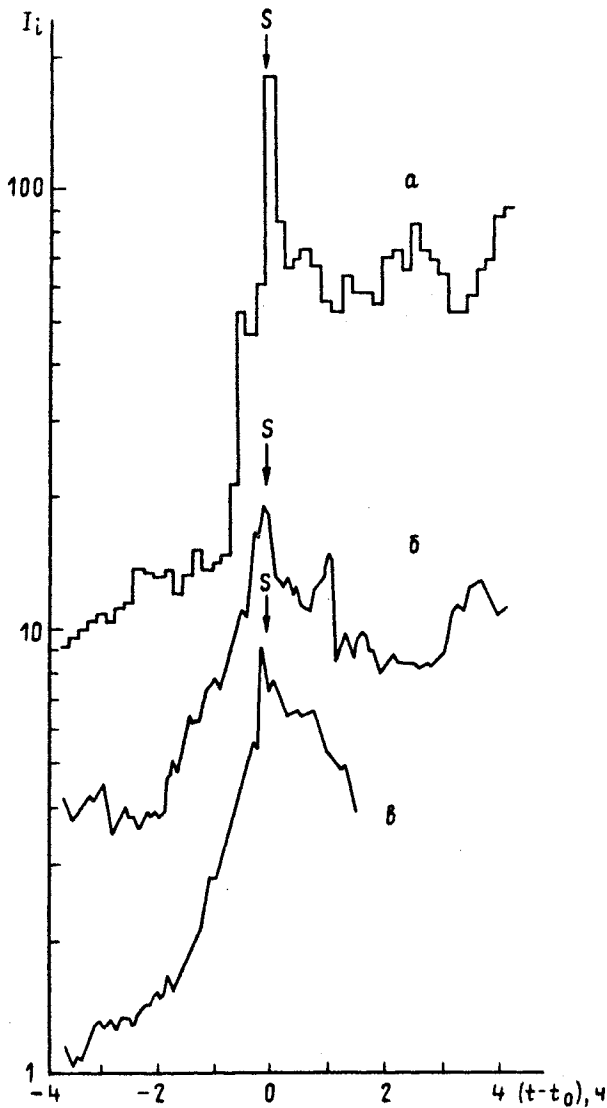


Рис.11. Потоки ионов  $I_i$  (производ. ед) с энергиями 1,4-5,8 МэВ по данным спутника "Прогноз-6" (а), с энергиями  $\geq 87$  кэВ по данным "Helios-1" (б) и с энергиями  $\geq 80$  кэВ по данным "Helios-2" с временным разрешением 5-10 мин в окрестности фронта межпланетной ударной волны 03.01.78

флуктуаций магнитного поля до, после и внутри фронта приводит к тому, что частицы могут проводить больше времени в его окрестности и, следовательно, получать большую энергию. Учитывая только малые флуктуации направления магнитного поля до фронта ударной волны  $\delta\beta \approx 10^\circ$ , можно показать, что в этом случае максимальная энергия, получаемая потоками при их взаимодействии с  $S$ , увеличивается примерно в 2 раза [52].

Анализ измерений магнитного поля на "Прогнозе-6" и "Helios-1" и "Helios-2" действительно показывает присутствие довольно крупных флуктуаций

его направления до и после фронта межпланетной ударной волны [32, 45] и, по-видимому, этот эффект способен объяснить наблюдающееся в окрестности  $S$  возрастание потоков ионов с энергиями  $\geq 80$  кэВ (рис. 11). Однако по данным измерений МПП на "Helios-2" угол  $\beta$  никогда не становился меньше  $35^\circ$ , тогда как в окрестности  $S$  на этом космическом аппарате (и на "Прогноз-6") наблюдалось возрастание потоков не только малоэнергичных ионов ( $\geq 87$  кэВ, рис. 11), но и потоков ионов с энергией  $\geq 4$  МэВ (рис. 10). Таким образом, в противоречии с теорией мы должны сделать вывод, что в окрестности наклонных межпланетных ударных волн также может наблюдаться ускорение энергичных заряженных частиц и что новые и более развитые модели необходимы для объяснения наблюдавшихся явлений [45, 53].

В заключение кратко просуммируем представленные в обзоре некоторые результаты измерений плазмы, магнитного поля и энергичных частиц в солнечном ветре и вблизи магнитопаузы в период МИМ.

В период минимума и на начальной стадии фазы роста солнечной активности структура солнечного ветра была нерегулярной, высокоскоростные потоки существенно изменялись за время одного оборота Солнца.

Выявлено различное поведение потоков энергичных электронов с энергиями порядка 1 МэВ в различных частях магнитопаузы - с дневной стороны на умеренных ( $35-50^\circ$ ) и с утренней стороны на высоких ( $60-75^\circ$ ) солнечно-магнитных широтах, свидетельствующее, что источником таких электронов в слое, прилегающем к магнитопаузе в переходной области, является внешний радиационный пояс.

На основании измерений плазмы, магнитного поля и энергичных частиц, проведенных на спутнике "Прогноз-6" и космических аппаратах "Helios-1", "2", объяснены основные особенности событий в солнечном ветре, происходивших после вспышки на Солнце 01.01.78 в 21.45 UT.

Показана возможность ускорения протонов до энергий в несколько МэВ в наклонных ударных волнах, требующая для своего объяснения уточнения механизма образования всплесков потока энергичных частиц (shock-spike) в окрестности фронта ударной волны.

#### Abstract

During the IMS period the measurements of plasma, magnetic field, and energetic particles in the solar wind and near the magnetopause were carried out onboard the "Prognoz 4-6" satellites. The data were analysed together with those of the other satellites for the same period. The obtained results indicate the outer radiation belt to be a source of energetic ( $E \approx 1$  MeV) electrons in the magnetosheath near the magnetopause. The data of the "Prognoz-5 and 6" satellites also show that in the minimum and the initial growth phase of the solar activity the solar wind structure was irregular. The study of some events related to the solar flare 01.01.78 from the satellites "Prognoz-6" and "Helios-1" and "2" data made it possible to assume the existence of some ion acceleration processes in the oblique shock waves.

## Список литературы

1. Грингауз К.И., Безруких В.В., Волков Г.И. и др. Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля-Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971-1973 гг. Ч.1. Методы и приборы. //Косм.исслед. 1974. Т.12. С.430-436.
2. Грингауз К.И., Безруких В.В., Бреус Т.К. и др. Исследование солнечной плазмы вблизи Марса и на трассе Земля-Марс при помощи ловушек заряженных частиц на советских космических аппаратах 1971-1973 гг. Ч.2. Характеристики электронов вдоль орбит искусственных спутников Марса "Марс-2" и "Марс-3" //Косм.исслед. 1974. Т.12. С.585-592.
3. Минеев Ю.В., Савенко И.А., Савельев В.Г., Спирькова Е.С. Излучение электронов с энергиями 0,3 - 3 МэВ на спутнике "Прогноз-4" // Геомагнетизм и аэрномия. 1978. Т.18. С.203-205.
4. Володичев Н.Н., Григорян О.Р., Девичева Е.А. и др. Предварительные результаты измерений солнечных частиц в событии 24 сентября 1977 г. по данным спутника "Прогноз-6" //Генерация и взаимодействие с веществом от источника до Земли/ IX Ленингр. семинар по космофизике. Л.: ЛИЯФ, 1978, С.251-252.
5. Беляков С.А., Девичева Е.А., Курт В.Г. и др. Некоторые результаты измерений спектров энергичных частиц в межпланетной среде на расстояниях 1,0-0,7 а.е. на АМС "Венера-11, -12" //Косм.исслед. 1979. Т.17. С.793-795.
6. Mineev Yu.V., Spirkova E.S., Gringauz K.I., Verigin M.I., Kotova G.A., Somogyi A.J. Prognoz-4 observations of electrons accelerated up to energies  $\leq 2$  MeV and of the cold plasma between the magnetopause and the bow shock. Budapest 1980. Preprint KFKI-1980-29. 11 p.
7. Meng C.-I., Anderson K.A. A layer of energetic electrons ( $>40$  keV) near the magnetopause //J.Geophys. Res. 1970. Vol.75. P.1827-1835.
8. Meng C.-I., Anderson K.A. Characteristics of the magnetopause energetic electron layer //J.Geophys. Res. 1975. Vol.80. P.4327-4332.
9. Page D.E., Domingo V., Köhr K., Taylor B.G., Wenzel K.P., Hedgcock P.C. High energy electrons at the magnetopause //Space Res. 1973. Vol. 13. P.631-635.
10. Domingo V., Page D.E., Wenzel K.P. Energetic and relativistic electrons near the polar plasmopause //J.Geophys. Res. 1977. Vol.82. P.2327-2332.
11. Formisano V., Domingo V., Wenzel K.P. On the location of the source for the energetic electron layer at the polar magnetopause and its relation to magnetic reconnection //J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. P.4579-4587.
12. Антонова А.Е., Николаева Н.С. Потоки энергичных электронов во внешней магнитосфере Земли по наблюдениям ИСЗ "Прогноз-3" //Геомагнетизм и аэрномия. 1979. Т.19. С.615-619.
13. Николаева Н.С., Писаренко Н.Ф. О спектре энергичных электронов вблизи магнитопаузы по измерениям на спутнике "Прогноз-3" //Косм.исслед. 1979. Т.17. С.302-303.
14. Palmer I.D., Hones E.W., Jr. Characteristics of energetic electrons in the vicinity of the magnetospheric boundary layer at Vela orbit //J.Geophys. Res. 1978. Vol. 83. P.2584-2589.

15. Daly P.M., Keppler E., Williams D.J. Ion and electron layers at the magnetopause: ISEE-2//Magnetospheric boundary layers—A Sydney Chapman conference, 1979. ESA SP-148, P.137-141.
16. Williams D.J., Fritz T.A., Wilken B., Keppler E. An energetic particle perspective of the magnetopause//J.Geophys. Res. 1979. Vol.84, P.6385-6394.
17. Williams D.J. Magnetopause characteristics at 0840-1040 hours local time//J.Geophys. Res. 1980. Vol.85. P.3387-3393.
18. Baker D.N., Stone E.C. The magnetopause electron layer along the distant magnetotail//Geophys. Res. Lett. 1977. Vol. 4. P.133-137.
19. Baker D.N., Stone E.C. The relationship of energy flow at the magnetopause to geomagnetic activity//Geophys. Res. Lett. 1977. Vol.4. P.395-398.
20. Baker D.N., Stone E.C. The magnetopause energetic electron layer. I. Observations along the distant magnetotail//J.Geophys. Res. 1978. Vol.83. P.4327-4334.
21. Bieber J.W., Stone E.C. Energetic electron bursts in the magnetopause electron layer and in interplanetary space//Magnetospheric boundary layers—A Sydney Chapman conference. 1979. ESA SP-148. P.131-134.
22. Bieber J.W., Stone E.C. Energetic electrons in the magnetosheath and upstream of the bow shock//J.Geophys. Res. 1982. Vol.87. P.85-90.
23. Richter A.K., Keppler E., Axford W.I., Denskat K.U. Dynamics of low energy electrons ( $\geq 17$  keV) and ions ( $\geq 80$  keV) in the vicinity of the low-latitude duskside magnetopause: Helios 1 and 2 observations//J.Geophys. Res. 1979. Vol. 84, P.1453-1457.
24. Минеев Ю.В., Савенко И.А., Савельев В.Г., Спирькова Е.С. Дифференциальные энергетические спектры и всплески электронов вблизи магнитосферы//Геомagnetизм и аэрoномия. 1979. Т.20. С.155-157.
25. Минеев Ю.В., Спирькова Е.С., Шестопалов И.П. Спектры электронов с энергией 0.03-3.0 МэВ, образующих слой в переходной области, по данным спутника "Прогноз-4"/Космич. исслед. 1981. Т.19. С.780-782.
26. King J.H. Interplanetary medium data book. Suppl. 1. NSSDC/WDC-A-R & S, 79-08.301 p.
27. Speiser T.W., Williams D.J., Garcia H.A. Magnetospherically trapped ions as a source of magnetosheath energetic ions//J.Geophys. Res. 1981. Vol.86. P.723-728.
28. Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Gosling J.T. Solar cycle evolution of high-speed solar wind streams//Astrophys. J. 1976. Vol.207. P.977-985.
29. Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C. Solar wind speed variations: 1962-1974//J.Geophys. Res. 1976. Vol. 81. P.5061-5069.
30. Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J., Gosling J.T. Long-term variations of selected solar wind properties: IMP 6,7 and 8 results//J.Geophys. Res. 1978. Vol.83. P.2117-2184.
31. Грингауз К.И. Энергетика межпланетной среды у орбиты Земли//Проблемы солнечно-земных связей. Ашхабад:ЫЛЫМ,1981.С.93-99.
32. Веригин М.И. Некоторые результаты исследований, выполненных в межпланетной среде при помощи широкоугольных плазменных детекторов на станции "Прогноз-6"//Исследования солнечной активности и космическая система "Прогноз". М.: Наука, 1984. С.81-86.

33. Crooker N.U., Solar cycle variations of the solar wind//Solar wind five, NASA Conference Publication 2280, 1983, P.303-307.
34. Zirker J.B., Coronal holes and high speed wind streams//Boulder: Colorado Associated Univ. Press, 1977. 267 p.
35. Borrini G., Gosling J.T., Bame S.J., Feldman W.C., Wilcox J.M., Solar wind helium and hydrogen structures near heliospheric current sheet: A signal of coronal streamers at 1 AU//J.Geophys. Res. 1981, Vol.86, P.4565-4581.
36. Gosling J.T., Borrini G., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C., Hansen R.T., Coronal streamers in the solar wind at 1 AU//J.Geophys. Res. 1981, Vol. 86, P.5438-5442.
37. Коваленко В.А., Филиппов М.А., Происхождение несжатых увеличений плотности в солнечном ветре//Астрон. ж. 1983. Т.60. С.1196-1198.
38. Hoeksema J.T., Structure and evolution of the large scale solar and heliospheric magnetic fields: Ph.D.Dissertation. CSSA-ASTRO-84-07, 1984, 352 p.
39. Коржов Н.П., Карты полярностей глобального магнитного поля Солнца и конфигурация межпланетного токового слоя в 1971-1978 гг./Препринт 2-82 СибИЗМИР, Иркутск, 1982. 31 с.
40. Hakamada K., Munakata Y., A cause of the solar wind speed variations: An update//J.Geophys. Res. 1984, Vol. 89, P.357-364.
41. Gringauz K.I., Verigin M.I., Kotova G.A., Eroshenko E.G., Simultaneous observations of the interplanetary shock wave by Prognoz-6 and ISEE-1, -2 satellites on October 26, 1977//Program and abstracts XVII IUGG General Assembly (Canberra, 1979), Ed. by N.Fukushima. 1979, P.335.
42. Russell C.T., Greenstadt E.W., Initial ISEE magnetometer results: Shock observations//Space Sci. Rev. 1979, Vol. 23, P.3-8.
43. Burlaga L., Lepping R., Weber R. et al., Interplanetary particles and fields, November 22 to December 6, 1977: Helios, Voyager and IMP observations between 0.6 and 1.6 AU//J.Geophys. Res. 1980, Vol. 85, P.2227-2238.
44. Kurt V.G., Stolpovskii V.G., Gombosi T.I. et al., Energetic particle, solar wind plasma and magnetic field measurements on board Prognoz-6 during the large scale interplanetary disturbance of Jan. 3-4, 1978, Budapest, 1980. Preprint KFKI-1980-32, 21 p.
45. Richter A.K., Verigin M.I., Kurt V.G. et al., The 3 January 1978 interplanetary shock event as observed by energetic particle, plasma and magnetic field devices on board of Helios-1, Helios-2 and Prognoz-6//J.Geophys. Res., 1981, Vol. 50, P.101-106.
46. Burgala L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R., Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations//J.Geophys. Res. 1981, Vol. 86, P.6673-6685.
47. D'Uston C., Dryer M., Han S.M., Wu S.T., Spatial structure of flare-associated perturbations in the solar wind simulated by a two-dimensional numerical MHD model//J.Geophys. Res. 1981, Vol.86, P.525-531.
48. Hundhausen A.J., Coronal expansion and solar wind//Heidelberg: Springer-Verlag, 1972, 268 p.
49. Kecskemety K., Gombosi T.I., Somogyi A. et al., Spacecraft determination of energetic particle propagation parameters: the 1 January 1978 solar event//17th Int. Cosmic Ray Conf. (Paris, 1981), 1981, Vol.3, P.89-92.

50. Scholer M., Morfil G.E. Simulation of solar flare particle interaction with interplanetary shock waves//Solar Phys. 1975. Vol.45. P.227-234.
51. Toptyghyn I.N. Acceleration of particles by shocks in a cosmic plasma// Space Sci. Rev. 1980. Vol.26. P.157-189.
52. Armstrong T.P., Chen G., Sarris E.T., Krimigis S.M. Acceleration and modulation of electrons and ions by propagating interplanetary phenomena. Dordrecht: D.Reidel Publ. Co., 1977. P.367-376.
53. Fisk L.A., Lee M.A. Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind//Astrophys. J.1980. Vol.237. P.620-624.