

ИЗУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, СОЗДАНЫХ В НПО ИМЕНИ С.А. ЛАВОЧКИНА

STUDY OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONSHIP BY MEANS OF SPACECRAFT BUILT BY LAVOCHKIN ASSOCIATION

Л.М. Зеленый ¹ , L.M. Zelenyi	В.В. Хартов ² , V.V. Khartov	Г.Н. Застенкер ¹ , G.N. Zastenker	Р.А. Ковражкин ¹ , R.A. Kovrazhkin	А.А. Петрукович ¹ , A.A. Petrukovich
А.А. Галеев ¹ , A.A. Galeev	В.Е. Бабышкин ² , V.E. Babyskhin	М.И. Артюхов ² , M.I. Artyukhov	А.Е. Ширшаков ² , A.E. Shirshakov	В.А. Молодцов ² , V.A. Molodtsov
М.И. Шевченко ¹ , M.I. Shevchenko	М.Н. Боярский ¹ , M.N. Bojarskii	Е.А. Гаврилова ¹ , E.A. Gavrilova	Л.С. Чесалин ¹ , L.S. Chesalin	В.И. Прохоренко ¹ , V.I. Prokhorenko
В.Н. Назаров ¹ , V.N. Nazarov	Б.С. Новиков ¹ , B.S. Novikov	Н.Л. Бородкова ¹ , N.L. Borodkova	Ю.И. Ермолаев ¹ , Yu.I. Yermolaev	О.Л. Вайсберг ¹ , O.L. Vaysberg
М.И. Веригин ¹ , M.I. Verigin	Ю.Н. Агафонов ¹ , Yu.N. Agafonov	Н.А. Эйсмонт ¹ , N.A. Eismont	В.Н. Луценко ¹ , V.N. Lutsenko	К. Кудела ³ , K. Kudela
Я. Балаж ³ , J. Balaz	З. Немечек ⁴ , Z. Nemecek	Я. Шафранкова ⁴ , J. Safrankova	Л. Прех ⁴ , L. Prech	Я. Войта ⁵ , Y. Vojta

В работе кратко описана большая серия исследований в области солнечно-земных связей, проведенных с использованием космических аппаратов, разработанных и изготовленных в НПО имени С.А. Лавочкина. Эти исследования принесли много новых и важных сведений о возмущениях Солнца, о межпланетной среде и о магнитосфере Земли.

Ключевые слова: возмущения Солнца; межпланетная среда; солнечный ветер; магнитосфера Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, солнечный ветер (СВ) – это испускаемый короной Солнца и постоянно существующий в межпланетной среде поток плазмы, который весьма изменчив во времени и является одним из основных агентов, переносящих к Земле многие возмущения, возникающие на Солнце.

Солнечный ветер является объектом систематического изучения уже более полувека, однако и в наше время исследование его является весьма актуальным.

The article overviews a big series of researches in the field of solar-terrestrial relationship using Spacecraft developed and manufactured by Lavochkin Association. The specified researches have made a significant contribution to the knowledge of Sun's disturbances, interplanetary medium as well as the Earth's magnetosphere.

Key words: Sun's disturbances; interplanetary medium; solar wind; the Earth's magnetosphere.

Регулярное изучение в ИКИ РАН межпланетной среды (в первую очередь, солнечного ветра и энергичных частиц), а также различных коротковолновых излучений Солнца с помощью космических аппаратов, созданных в НПО имени С.А. Лавочкина (НПОЛ), началось с 1972 года с запуска первых высокоэллиптических спутников серии «ПРОГНОЗ» и продолжается оно до сих пор. В этой статье мы сделаем краткий обзор наиболее важных результатов, полученных в этом направлении.

¹ ФГБУН Институт космических исследований РАН, Россия, г. Москва.

Space Research Institute of RAS, Russia, Moscow.

² ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

³ Институт экспериментальной физики Словацкой Академии наук, Словакия.

Institute of Experimental Physics of Slovak Academy of Sciences, Slovakia.

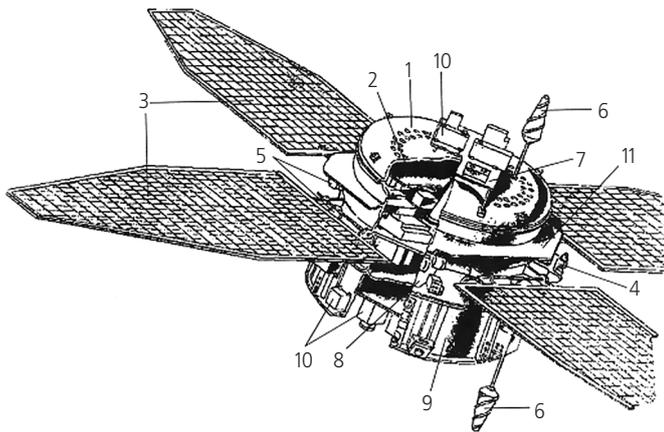
⁴ Карлов Университет, Чешская Республика, г. Прага.

Charles University, Czech Republic, Prague.

⁵ Институт физики атмосферы ЧАН, Чешская Республика, г. Прага.

Institute of Atmospheric Physics AS CR, Czech Republic, Prague.

1. Некоторые характеристики спутников серии «ПРОГНОЗ»



- 1 – контейнер; 2 – рамы для наружных приборов;
3 – панели солнечной батареи; 4 – датчики Солнца;
5 – баллоны с рабочим телом; 6 – связные антенны;
7 – верхняя плита; 8 – боковые рамы для приборов;
9 – проставка; 10 – наружные приборы;
11 – защитный экран.

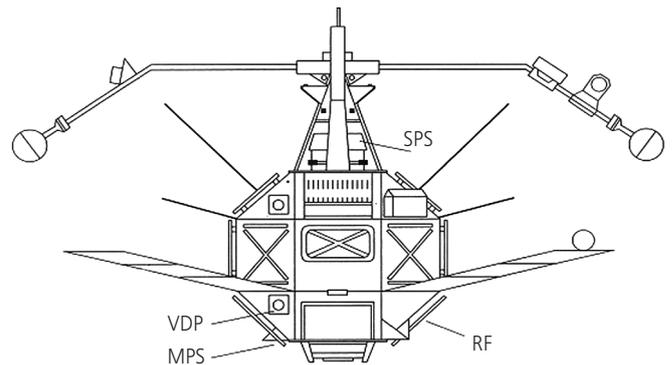
рисунок 1. Схематическое изображение спутника «ПРОГНОЗ-М2»

Основой конструкции аппарата «ПРОГНОЗ-М2» является цилиндрический герметичный приборный контейнер, внутри которого устанавливается служебная аппаратура и ряд электронных блоков научной аппаратуры. К этому контейнеру крепятся четыре панели солнечной батареи, антенны для связи с Землей, датчики системы ориентации, а также верхняя плита и боковые рамы для установки научных приборов снаружи. На солнечных панелях устанавливаются штанги с датчиками для измерения магнитных и электрических полей и антенны для регистрации радиоизлучения.

Спутник снабжен системой ориентации, обеспечивающей направление его продольной оси на Солнце и закрутку КА вокруг этой оси, системами терморегулирования, электропитания и радиотелеметрическим комплексом (детальное описание характеристик всех систем см. в (Кремнев Р.С., Смирнов А.И., Горкин С.С., 1996).

Существенной особенностью проекта «ИНТЕРБОЛ» было то, что спутники типа «ПРОГНОЗ-М2» («ИНТЕРБОЛ-1» и «ИНТЕРБОЛ-2») были дополнены разработанными и изготовленными в Чешской Республике в сотрудничестве с ИКИ РАН и научными коллективами ряда других стран субспутниками «МАГИОН-4» и «МАГИОН-5» (см. их описание в (Агафонов Ю.И., Войта Я., Триска П., Храпченков В.В., 1996). Эти субспутники также несли довольно значительный набор научной аппаратуры. Они

были запущены вместе с основными спутниками и совершали свой полет, находясь на сравнительно небольших расстояниях (в пределах от 100 до 1000 км) от основных КА (Кремнев Р.С., Смирнов А.И., Горкин С.С., 1996). Наличие одновременных измерений параметров межпланетной среды с помощью однотипной аппаратуры в двух точках позволяло решить извечную дилемму – являются ли наблюдаемые вариации параметров следствием их изменения во времени или проявлением пространственной неоднородности среды.



- SPS, MPS – спектрометры электронов и протонов;
VDP – монитор потоков плазмы;
RF – рентгеновский фотометр.

рисунок 2. Схематическое изображение субспутника «МАГИОН-4»

2. Прием данных в ИКИ, их обработка и архивация

Для систематической оперативной работы со спутниками серии «ПРОГНОЗ», как и с другими КА для изучения солнечно-земных связей, и работы с получаемыми от них данными в ИКИ был создан ЦОНИ – центр обработки научной информации, осуществлявший функции оперативного управления научной аппаратурой и получения научной информации от КА в сеансах связи, архивирования этой информации, проведения ее экспресс-обработки и оперативного анализа и передачи этой информации группам экспериментаторов для дальнейшей ее обработки.

3. Некоторые результаты по изучению солнечного ветра, полученные в экспериментах на спутниках «ПРОГНОЗ» – «ПРОГНОЗ-9»

Регулярные измерения с аппаратурой ИКИ РАН в межпланетной среде (в первую очередь измерения солнечного ветра и энергичных частиц) начались с 1972 года и продолжают до сих пор. Здесь мы дадим очень краткий обзор наиболее важных результатов, полученных в этом направлении.

3.1. Экстремальные события 1972 года

Измерения солнечного ветра, проведенные ИКИ в 1972 году, оказались весьма важными в том смысле, что они столкнулись с экстремальными, ранее не наблюдавшимися условиями в межпланетной среде. Эти условия были созданы серией последовательности из четырех экстремально сильных солнечных вспышек со 2 по 7 августа 1972 года и последующим приходом к Земле 4 и 8 августа серии сильных межпланетных ударных волн (МУВ). Параметры плазмы солнечного ветра при прохождении этих МУВ были успешно зарегистрированы аппаратурой наших спутников «ПРОГНОЗ» и «ПРОГНОЗ-2», а также американских спутников «ПИОНЕР-9» и «ПИОНЕР-10» (Вайсберг О.Л., Камбу Ф., Застенкер Г.Н. и др., 1976; Cambou F., Vaisberg O., Espagne H. et al., 1975).

На рисунке 3 представлена картина изменения параметров солнечного ветра (переносной скорости, температуры и плотности ионов) в виде среднечасовых значений этих параметров для периода 4–12 августа 1972 года.

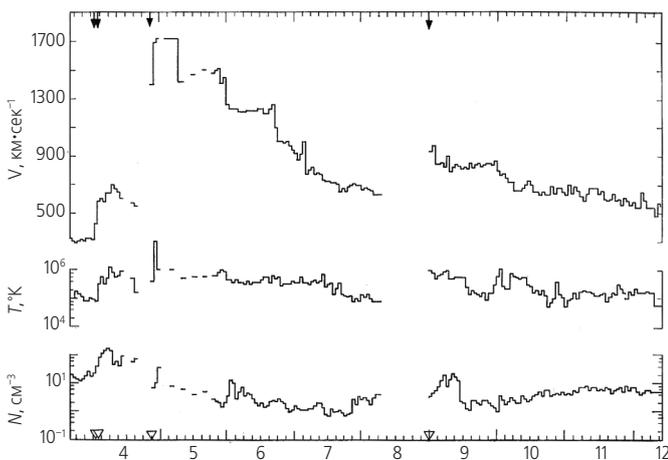


рисунок 3. Среднечасовые значения параметров солнечного ветра в период 4–12 августа 1972 года по данным спутников «ПРОГНОЗ» и «ПРОГНОЗ-2». Стрелками вверху отмечены моменты прихода межпланетных ударных волн от четырех сильных солнечных вспышек

Обращают на себя внимание экстремальные значения параметров ветра в отдельные моменты рассматриваемого интервала: возрастание плотности до $150 \text{ част. см}^{-3}$; увеличение температуры ионов выше 10 млн. К; повышение среднечасовой переносной скорости СВ выше 1700 км/с (а на отдельных временных интервалах скорость ветра достигала почти 2000 км/с – величины, никогда ранее не наблюдавшейся).

По нашим измерениям были сделаны оценки энергии и массы, переносимых за этими ударными вол-

нами: для энергии были получены значения от 3 до $26 \cdot 10^{32}$ эрг, а для массы от 4 до $60 \cdot 10^{16}$ г. Эти оценки значительно превосходили максимальные значения, полученные ранее. Таким образом, сильные солнечные вспышки в августе 1972 года отметились рекордными значениями параметров солнечного ветра.

3.2. Некоторые другие результаты, полученные на спутниках серии «ПРОГНОЗ»

Измерения параметров солнечного ветра регулярно продолжались на спутниках «ПРОГНОЗ-3» – «ПРОГНОЗ-9». Не останавливаясь на деталях всех этих многочисленных экспериментов, отметим только результаты, полученные на спутнике «ПРОГНОЗ-7».

Особенностью этих измерений было использование селективных измерений протонов и альфа-частиц, что позволяло определять их энергетические спектры при любых значениях параметров (Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н. и др., 1990). По этим данным были изучены соотношения между скоростями и температурами отдельных компонент. Так, например, была получена зависимость отношения температур T_α/T_p от разности скоростей $V_\alpha - V_p$ по данным «ПРОГНОЗА-7» в сравнении с данными аппаратов «IMP6-8» и «OGO-5».

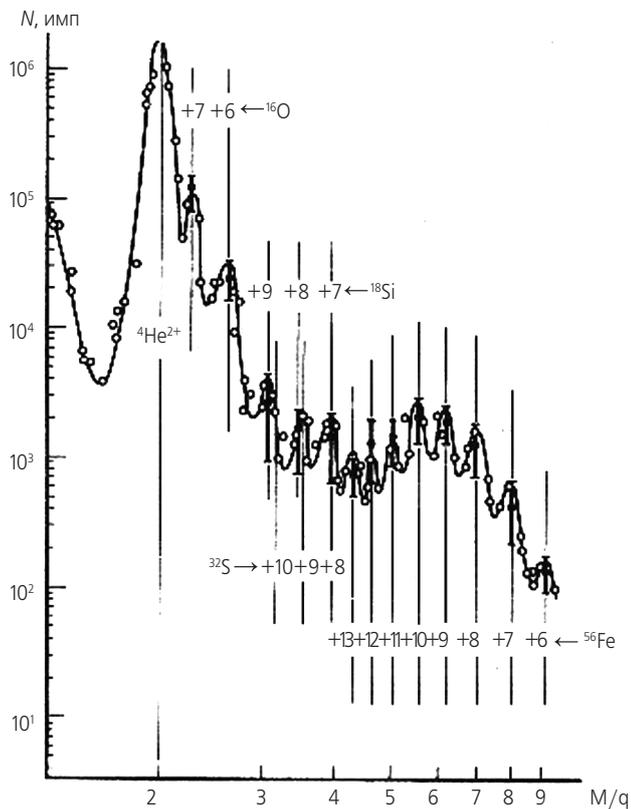
Основное отличие данных «ПРОГНОЗА-7» от данных других экспериментов заключается в том, что по нашим данным отношение температур возрастает при увеличении модуля разности скоростей независимо от знака этой разности.

3.3. Регистрация тяжелых ионов солнечного ветра

Как известно, в солнечном ветре, кроме двух основных ионных компонент – протонов и ионов гелия, существует еще весьма небольшая (на уровне 0.01% и менее) примесь ионов более тяжелых элементов. Наблюдения этих тяжелых ионов представляют особый интерес, так как они позволяют самым прямым методом определить химический состав и оценить физическое состояние солнечной короны. При этом существенно, что в отличие от основных кинетических параметров солнечного ветра, которые заметно изменяются при его движении от Солнца до орбиты Земли, относительное содержание тяжелых ионов «замораживается» в нижней короне Солнца на том уровне, где еще происходят неупругие соударения, и далее при движении ветра в разреженной межпланетной среде остается неизменным.

В наших измерениях спектров потока ионов по энергии на заряд благодаря высокому энергетическому разрешению и высокой чувствительности спектрометра солнечного ветра на спутнике «ПРОГНОЗ-7» удалось впервые четко выделить в энергетических спектрах ионов, измеренных при низкой скорости и низкой температуре протонов, множество дополнительных пиков, принадлежащих ионам более тяжелых, чем водород и гелий, элементов с различной степенью ионизации (Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. и др., 1984).

В предположении, что все тяжелые ионы движутся с той же переносной скоростью, что и ионы гелия, такие энергетические спектры можно преобразовать в массовые спектры ионов солнечного ветра (точнее – в спектры по отношению массы к заряду). Пример такого спектра, синтезированного из набора измерений при изменяющейся скорости СВ, представлен на рисунке 4.



рисунк 4. Спектр солнечного ветра по массе на заряд. Видны пики гелия, кислорода, кремния, серы и железа с разной степенью ионизации, отмеченной цифрами у вертикальных линий

Показанные в этом спектре пики тяжелых ионов были идентифицированы как ионы кислорода O(16) с ионизацией +6 и +7, ионы кремния Si(18) с ионизацией +9, +8 и +7, ионы серы S(32) с ионизацией +9, +8 и +7 и многочисленные ионы железа Fe(56) с высокой степенью ионизации от +13 до +16.

При этом относительное (по отношению к протонам) содержание тяжелых ионов, полученное нами, составляет в этом событии около $5 \cdot 10^{-3}$ для кислорода и около $1 \cdot 10^{-4}$ для кремния и железа.

В наших измерениях было получено большое количество подобных спектров для периода спокойного солнечного ветра в течение четырех суток в декабре 1978 года с низкой переносной скоростью (260–310 км/с), низкой температурой протонов и альфа-частиц (2–4 эВ) и высокой концентрацией ионов ($10\text{--}30 \text{ см}^{-3}$).

Динамика среднечасовых значений плотности тяжелых элементов за этот период показывает их вариации в пределах порядка величины, чего не было выявлено в предыдущих экспериментах. Отметим, что в таких областях с высоким содержанием тяжелых ионов их энергия может составлять значительную часть (до 30%) от кинетической энергии солнечного ветра.

Значения высоты пиков ионов разной массы и степени ионизации могут быть использованы для оценки температуры солнечной короны. В соответствии с имевшимися модельными расчетами из наших измерений были получены средние значения этой температуры для разных пар ионов от железа до кислорода в пределах от 0.8 до 2.8 млн. К, что неплохо соответствует данным других измерений и отражает то существенное обстоятельство, что разные ионы «замораживаются» на разных высотах в солнечной короне, т.е. при разных температурах.

3.4. Структура околоземной ударной волны (проект «ИНТЕРШОК»)

В 1985 году коллективы сотрудников ИКИ РАН и их чехословацких коллег, подготовили и осуществили большой совместный проект «ИНТЕРШОК», посвященный исследованию тонкой структуры околоземной ударной волны, образующейся при набегании солнечного ветра на магнитосферу Земли. Основная методическая трудность этой задачи заключалась в необходимости проведения детальных измерений как можно большего количества физических параметров плазмы, магнитного поля и энергичных частиц при весьма быстром (за несколько минут или даже за доли минуты) пересечении спутником фронта околоземной ударной волны.

Эта задача была успешно решена в эксперименте на спутнике «ПРОГНОЗ-10–ИНТЕРКОСМОС» в период с апреля по ноябрь 1985 года. Результаты эксперимента детально описаны в специальном выпуске журнала «Космические исследования» (Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З. и др., 1986), а также в журнале «Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (Застенкер Г.Н... Проект «ИНТЕРШОК», 2012) и в ряде последующих публикаций.

В комплекс научных приборов спутника «ПРОГ-НОЗ-10–ИНТЕРКОСМОС» входили:

- плазменный спектрометр с быстрым анализом энергетических спектров и угловых распределений протонов, альфа-частиц и электронов;
- анализатор низкочастотных (от 0.5 Гц до 30 КГц) колебаний электрического и магнитного поля и потока ионов плазмы с обработкой спектров на борту;
- трехкомпонентный магнитометр;
- комплекс приборов для измерения потоков, спектров и анизотропии ускоренных ионов и электронов в диапазоне энергий от десятков КэВ до нескольких МэВ;
- рентгеновский фотометр для измерения всплесков солнечного излучения;
- анализатор километрового радиоизлучения Солнца;
- бортовая вычислительная машина с большой кольцевой памятью для организации быстрых измерений при пересечении спутником ударной волны.

Плазменный комплекс этой аппаратуры с помощью широкого набора электростатических анализаторов позволял измерять с высокими временным, энергетическим и угловым разрешениями различные сечения функции распределения ионов по скоростям. В качестве примера рассмотрим изменение функции распределения ионов солнечного ветра при пересечении околоземной ударной волны для перехода потока плазмы из межпланетной среды в магнитослой. Наблюдаемая при этом пространственная картина энергетических спектров потока плазмы представлена на рисунке 5.

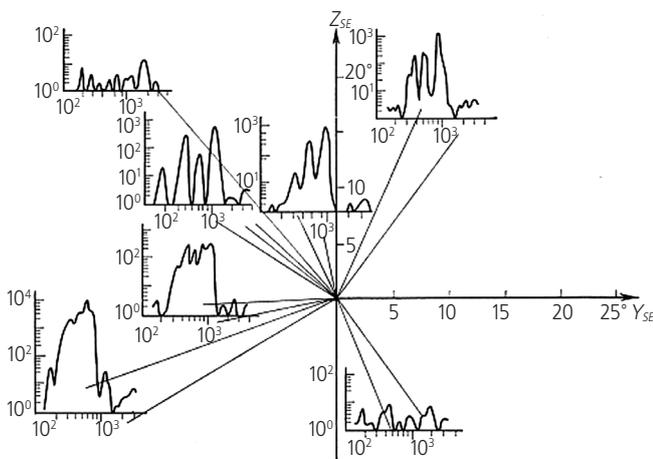


рисунок 5. Энергетические спектры потока ионов, наблюдаемые в разных направлениях сразу же за фронтом ударной волны. По оси абсцисс каждого графика отложены энергии ионов в эВ, по оси ординат – отсчеты в условных единицах

Схематически (по плазменным измерениям и измерениям вариаций магнитного поля) была выделена такая последовательность областей в структуре околоземной ударной волны со стороны солнечного ветра:

- область развития сравнительно высокочастотных колебаний потока плазмы и магнитного поля;
- более протяженная область низкочастотных колебаний плазмы и поля, в которой происходит постепенный разогрев электронной компоненты, возрастание магнитного поля и (в конце области) резкий и большой поворот потока ионов;
- узкая (порядка 1 с) область резкого скачка магнитного поля («рампы»), в которой функция распределения ионов разбивается на отдельные пучки или сгустки во всем диапазоне углов и энергий;
- весьма протяженная (несколько минут) область постепенной релаксации пучков и сглаживания функции распределения ионов.

Получение впервые такой картины тонкой структуры околоземной ударной волны и явилось основным результатом проекта «ИНТЕРШОК».

3.5. Некоторые результаты, полученные на спутнике «ИНТЕРБОЛ-1»

Измерения солнечного ветра были продолжены в проекте «ИНТЕРБОЛ» на высокоапогейном спутнике «ИНТЕРБОЛ-1» в 1995–96 гг. Результаты этих систематических измерений вместе с одновременными данными по солнечному ветру, полученными на двух других космических аппаратах – «WIND» и «IMP-8», были использованы для изучения вопроса о количественном соответствии измерений СВ на разных аппаратах, сильно разнесенных в пространстве (Застенкер Г.Н., Далин П.А., Лазарус А. Дж. и др., 1998; Застенкер Г.Н... Проект «ИНТЕРБОЛ», 2012).

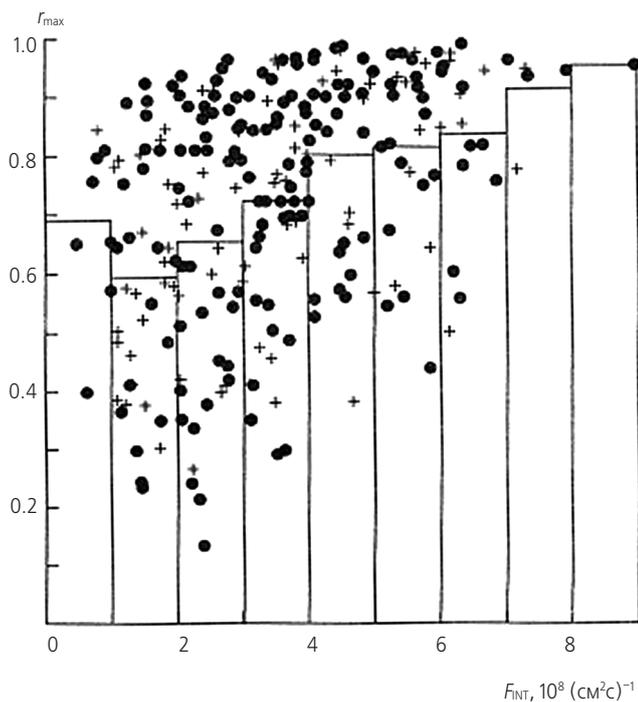
В качестве количественного критерия соответствия различных измерений использовался коэффициент их кросс-корреляции на шестичасовых интервалах. При этом расстояния между аппаратами за рассматриваемый период варьировались от 20 до 200 Re по оси Xgse и от +35 до –25 Re по оси Ygse. Отметим, что ось Xgse направлена на Солнце, а ось Ygse перпендикулярна к ней и лежит в плоскости эклиптики.

Конечно, прежде всего, была проверена интеркалибровка разных приборов, и было показано, что между их показаниями имеется очень хорошее соответствие.

Усредненная по довольно большому ансамблю (более 1400 часов измерений) величина коэффициента кросс-корреляции потоков ионов составляет 0.73. Рассмотрено влияние различных факторов на эту корреляцию (скорости и величины потока, расстояния между аппаратами вдоль осей Xgse и Ygse, величины относительных вариаций потока) и показано, что воздействие последнего фактора наиболее сильное.

Корреляция временных рядов измерений скорости солнечного ветра оказывается значительно более высокой – до 0.88.

В качестве примера на рисунке 6 показана зависимость коэффициентов кросс-корреляции потоков ионов для пар «ИНТЕРБОЛ-1»/«ИМР-8» (крестики) и «ИНТЕРБОЛ-1»/«WIND» (кружки) от средней по сегменту величины потоков ионов солнечного ветра. Видно, что с ростом средней величины потока корреляция измерений на двух КА заметно увеличивается.



рисунк 6. Коэффициенты корреляции потоков ионов солнечного ветра, измеренных на аппаратах «ИНТЕРБОЛ-1» и «ИМР-8» (крестики) и «ИНТЕРБОЛ-1» и «WIND» (кружки). Прямоугольниками показаны средние значения потоков ионов

Можно сделать вывод, что большие вариации потоков ионов солнечного ветра являются проявлением достаточно крупномасштабных структур, которые коррелируют и на довольно больших расстояниях между аппаратами.

3.6. Изучение магнитосферы по данным спутников «ИНТЕРБОЛ-1» и «ИНТЕРБОЛ-2»

Как уже говорилось, основной научной задачей проекта «ИНТЕРБОЛ» являлось изучение активных процессов в магнитосфере Земли и их связей, во-первых, с процессами в межпланетной среде и на Солнце, и, во-вторых, с явлениями в авроральной (полярной) магнитосфере. Эти работы были посвящены исследованиям следующих магнитосферных процессов и явлений:

- механизмы проникновения частиц солнечного ветра во внутренние области земной магнитосферы;
- изменение конфигурации магнитного поля в хвосте магнитосферы при накоплении в нем магнитной энергии;
- генерация продольных токов, поддерживающих связь ионосферных токовых систем с магнитосферой;
- особенности функций распределения частиц и их ускорение в хвосте магнитосферы и в полярных областях;
- генерация аврорального километрового излучения;
- высвобождение и диссипация энергии, накопленной в магнитосферном хвосте.

В этом подразделе будет приведена некоторая часть результатов по ускорению и транспорту энергичных частиц и сверхтепловой плазмы.

3.6.1. Пучки моноэнергетических ионов около границ магнитосферы

Ранее считалось общепризнанным, что спектры энергичных частиц имеют гладкую форму с отрицательным наклоном. Эксперимент ДОК-2 на спутниках «ИНТЕРБОЛ-1» и «ИНТЕРБОЛ-2» подтвердил, что в большинстве случаев это соответствует действительности, особенно для усредненных по времени спектров. Однако нами впервые было установлено, что существуют и спектры совсем иного типа. В солнечном ветре перед фронтом околосолнечной ударной волны, в магнитослое перед магнитопаузой и на границе плазменного слоя хвоста магнитосферы были обнаружены пучки почти моноэнергетических ионов (ПМИ) (*Lutsenko V.N., GavriloVA E.A., 2011*). В наиболее общем случае в этих спектрах наблюдались три линии с характерным отношением энергий 1:2:(5–6), рисунок 7.

Открытое нами явление может быть связано с ускорением ионов солнечного ветра (H^+ , He^{+2} , CNO^{+5-6}) во всплесках электростатического поля, возникающих при разрыве волокон в токовых слоях, образующих границы магнитосферы. Ускорение должно происходить в достаточно малой области (~1000 км

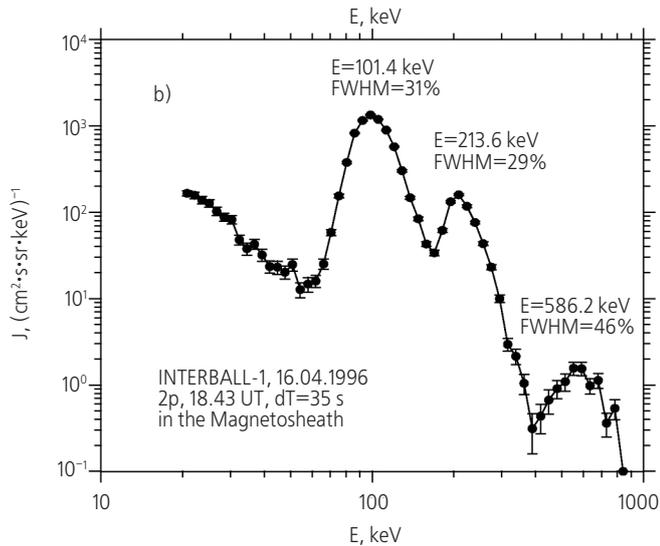


рисунок 7. Типичный энергетический спектр потоков ускоренных ионов в магнитослое

на магнитопаузе) с взаимно перпендикулярными магнитным и электрическим полями. Здесь электроны замагничены и не могут ускоряться, а ионы могут свободно ускоряться до энергии, пропорциональной их заряду. Можно ожидать, что разность потенциалов на разрыве будет равна полному падению потенциала на магнитосфере, равному примерно 80–100 кэВ. Это значение совпадает с полученным нами средним значением энергии протонной линии.

Разрыв токовых волокон может возникнуть в результате неустойчивости в токовом слое, разделяющем противоположно направленные магнитные поля, например в нейтральном слое. Ток здесь является средством концентрации в малой области пространства энергии и разности потенциалов, распределенных ранее в большом объеме (*Lutsenko V.N., Gavrilova E.A., 2011*).

3.6.2. Дисперсионные структуры ионов (VDIS и TDIS) в авроральной магнитосфере

Для механизмов нагрева и ускорения плазмы в хвосте магнитосферы определяющее значение имеют процессы пересоединения межпланетного и геомагнитного полей и процессы развития крупномасштабных неустойчивостей при реконфигурации магнитного поля в ходе развития вспышечных явлений во время суббурь. Поиски свидетельств этих процессов привели к обнаружению двух различных типов энергодисперсионных структур ионов (VDIS и TDIS), являющихся автографами ускоренных пучков ионов и позволяющих «лоцировать» активные области в плазменном слое (*Kovrazhkin R.A., Sauvaud J.A., 2004*).

Первый тип структур (VDIS) представляет собой длительные (5–20 мин), квазистабильные во време-

ни дисперсионные структуры с энергией 1–20 кэВ на полярном краю авроральной зоны; энергия в них увеличивается с геомагнитной широтой. Детальный анализ показал, что такая структура состоит из субструктур, сформированных при распространении в магнитосфере ионных пучков («бимлетов»), ускоренных в выделенных резонансных областях пограничного плазменного слоя. Экспериментальная проверка теоретически предсказанной (*Зеленый Л.М., Долгонос М.С., Григоренко Е.Е., Согов Ж.А., 2007*) масштабной инвариантности энергии пучков, т.е. скейлинга: $W_N \sim N^A$, (W_N – энергия на N-резонансе, $A \sim 1.33$), показала, что скейлинг резонансных энергий по данным эксперимента имеет широкие вариации $A \in [0.61; 1.75]$ и не зависит от геомагнитных индексов Kp и AE. Модельные расчеты с учетом электрического поля E_z , перпендикулярного токовому слою, хорошо согласуются с экспериментальными данными и свидетельствуют (*Коврашкин Р.А., Долгонос М.С., Согов Ж.А., 2012*) об увеличении скейлинга при доминировании ионного тока и его уменьшении при доминировании электронного тока ($A > 1.33$ либо $A < 1.33$ соответственно).

Второй тип структур (TDIS) – это спорадические повторяющиеся кратковременные (1–3 мин) инъекции ионов с энергиями 2–30 кэВ, наблюдаемые практически на одной широте; энергия в них зависит от времени пересечения TDIS спутником.

Образование VDIS интерпретируется как процесс, связанный с формированием и распространением пучков ускоренных ионов из области пограничного плазменного слоя в поле конвекции (50–120 R_E , R_E – радиус Земли) при квазистационарном пересоединении в хвосте, в то время как процесс формирования TDIS может быть связан с генерацией и инъекцией ионов из области более близкого плазменного слоя (8–30 R_E), ускоренных на фронте неустойчивости вблизи полярного края области аврорального овала в период повышения активности или суббури.

На рисунке 8 представлены два типа энергодисперсионных структур частиц на двух сечениях авроральной зоны. Сверху вниз: вариации AE- и АО-индексов; энерговременная спектрограмма электронов с измеренными питч-углами; энерговременная спектрограмма протонов с измеренными питч-углами (AE- и АО-индексы даны в nT; стрелками помечены времена прохождения спутником «ИНТЕРБОЛ-2» полярных границ двух сечений авроральной зоны; квадратами обозначены субструктуры VDIS; треугольниками – инъекции TDIS; e^- – электроны; H^+ – протоны; ПУ – питч-угол; черно-белым кодом показано изменение логарифма дифференциальных потоков энергии в кэВ/см² с стер кэВ; H – высота в км; ILAT – инвариантная широта в градусах; MLT – местное магнитное время в часах).

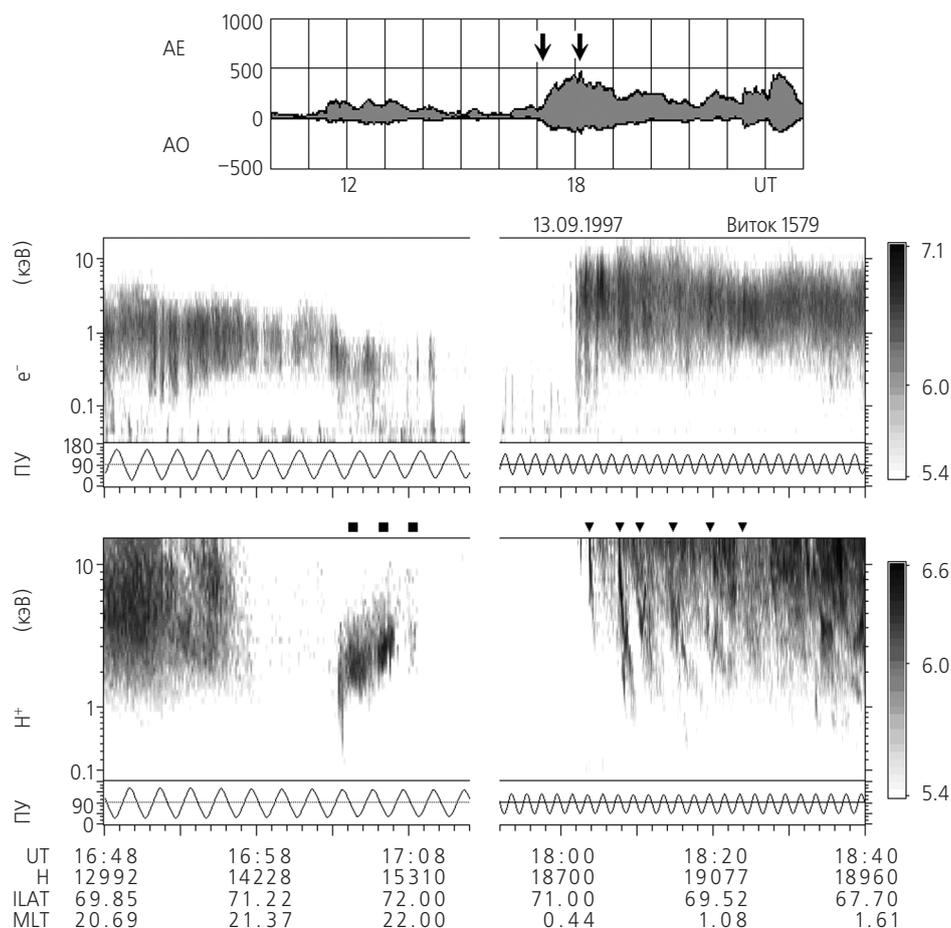


рисунок 8. Энергодисперсионные структуры

3.7. Разные типы солнечного ветра и магнитные бури

Были предприняты систематические исследования связи магнитных бурь на Земле с характеристиками солнечного ветра (Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г. и др., 2007).

Действительно, солнечный ветер играет ключевую роль в переносе возмущений от Солнца к Земле и в возбуждении магнитных бурь и суббурь. Эти возмущения обычно связывают с появлением в солнечном ветре южной ($B_z < 0$) компоненты ММП, так как в этом случае магнитосфера становится открытой для поступления энергии СВ вовнутрь магнитосферы. Обычный стационарный солнечный ветер содержит ММП, лежащее в плоскости солнечного экватора, и поэтому не является геоэффективным, только возмущенные типы солнечного ветра могут содержать B_z -компоненту ММП, включая и южную.

На рисунке 9 в качестве примера приведена взятая из работы (Котова Г.А., Грингауз К.И., Безруких В.В. и др., 1987) картина зависимости интенсивности магнитосферного возмущения (описываемой Dst -индексом) от амплитуды отрицательной компоненты B_z ММП для различных типов солнечного ветра

(быстрый ветер, медленный ветер, области сжатия и т.п.). Не вдаваясь в детали, отметим, что для всех типов ветра интенсивность магнитной бури (или суббури) сильнее всего возрастает при увеличении амплитуды компоненты $B_z < 0$.

Несмотря на довольно большой разброс данных, из аппроксимирующей кривой этого графика четко видно, что значения скорости ветра в среднем заметно увеличиваются, когда спутник отклоняется на значительный угол от токового слоя. В работе (Котова Г.А., Грингауз К.И., Безруких В.В. и др., 1987) выдвинуто предположение, что это явление отражает глобальную гидродинамику расширения солнечной короны в целом.

Раздельное изучение в (Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г. и др., 2007) влияния различных типов солнечного ветра позволило, во-первых, более надежно предсказывать появление магнитосферных возмущений, так как различные источники возмущений имеют различную вероятность обладания южной компонентой ММП (т.е. разной «геоэффективностью»), и, во-вторых, исследовать различия механизмов генерации магнитосферных возмущений разными источниками, так как при одной и той

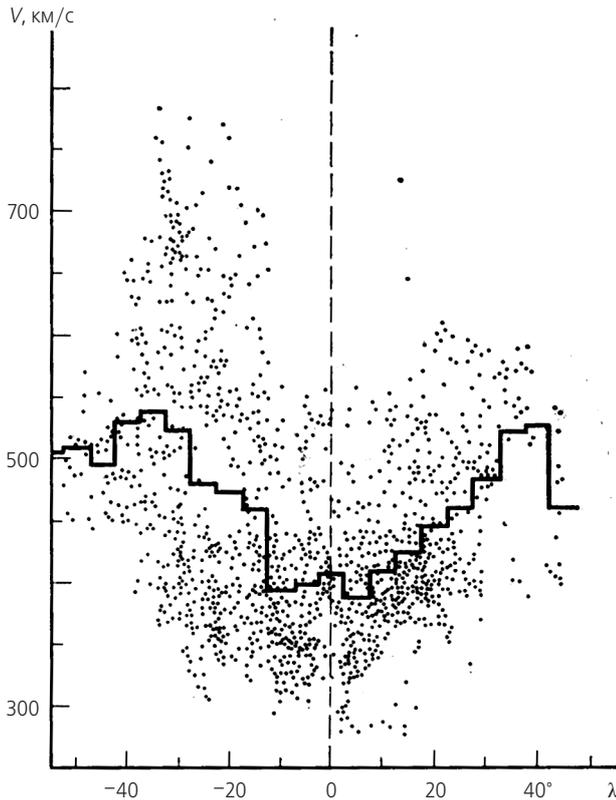


рисунок 9. Зависимость скорости солнечного ветра от углового расстояния от токового слоя

же $V_z < 0$ отклик магнитосферы (т.е. «эффективность процесса») оказывается разным в зависимости от типа источника.

Указанные исследования показывают, что «геоэффективность» (т.е. вероятность содержать $V_z < 0$) выше в магнитных облаках, а «эффективность процесса» (т.е. возбуждение бурь и суббурь) оказывается более сильной в слоях сжатия или при взаимодействии быстрого и медленного потоков. Геоэффективность (вероятность процесса генерации магнитной бури) для *SME* (выброса корональной массы) и вспышек составляет 40–60%, что лишь немного превышает вероятность случайных процессов. Из этого следует, что прогноз геомагнитных бурь на основании лишь солнечных наблюдений может содержать большой процент «ложных тревог».

3.8. Быстрые вариации солнечного ветра – эксперимент «ПЛАЗМА-Ф» на спутнике «СПЕКТР-Р»

Новая страница в исследовании солнечного ветра была открыта экспериментом «ПЛАЗМА-Ф» на спутнике «СПЕКТР-Р», запущенном в 2011 году. Если во всех предыдущих наших экспериментах, как и в ныне функционирующих зарубежных экспериментах, временное разрешение измерений пара-

метров солнечного ветра составляло от нескольких десятков секунд до нескольких секунд, то с помощью нашего плазменного спектрометра БМСВ на спутнике «СПЕКТР-Р» это временное разрешение было уменьшено вплоть до 30 мсек (Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др., 2013). Другой особенностью прибора БМСВ была возможность непрерывного определения направления вектора потока ионов. Это позволило получить качественно новые и важные результаты (Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др., 2013; Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А. и др., 2013; Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М., Петрукович А.А. Эксперимент «ПЛАЗМА-Ф»..., 2012).

Прежде всего, был показан струйный характер солнечного ветра, заключающийся в том, что поток ионов не однороден, а состоит из отдельных струек с постоянно меняющимся направлением движения. В качестве типичного примера на рисунке 10 показан временной ход величины и направления потока ионов солнечного ветра.

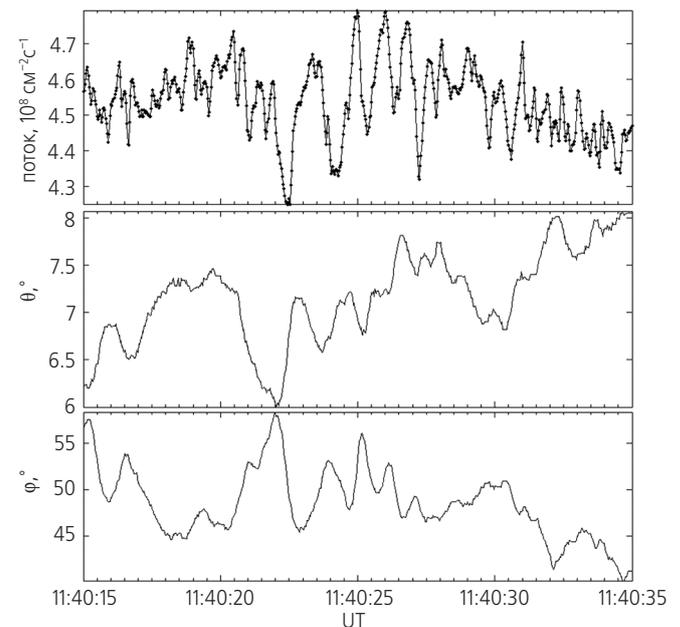


рисунок 10. Вариации вектора потока ионов солнечного ветра

На графике хорошо видны вариации не только величины, но и полярного и азимутального углов потока с временными изменениями в масштабах примерно от 1 секунды до 5 секунд.

Впервые было показано, что частотные спектры флуктуаций потока ионов (см. пример на рисунке 11) как для величины потока, так и для его полярного угла имеют две ветви с разными наклонами – низкочастотную (показатель наклона p_1) и высокочастотную (показатель наклона p_2) – и граница между этими ветвями находится на частоте примерно 1–3 Гц.

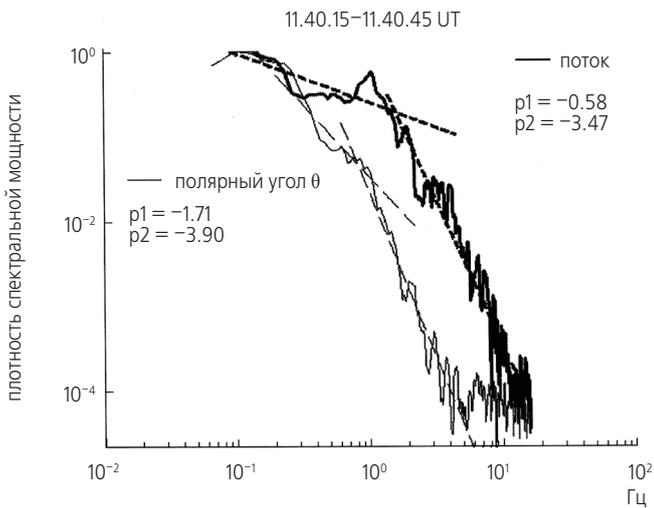


рисунок 11. Спектры флуктуаций потока и углов

Существенное продвижение было достигнуто в вопросе о толщине фронтов межпланетных ударных волн (МУВ). В прежних экспериментах эта толщина не могла быть измерена из-за недостаточного временного разрешения, так как вследствие высокой скорости движения МУВ (300–600 км/с) ее фронт пробегает мимо космического аппарата за доли секунды.

В качестве примера на рисунке 12 показана регистрация фронта МУВ прибором БМСВ на спутнике «СПЕКТР-Р» – изменение величины потока ионов и полярного угла его направления.

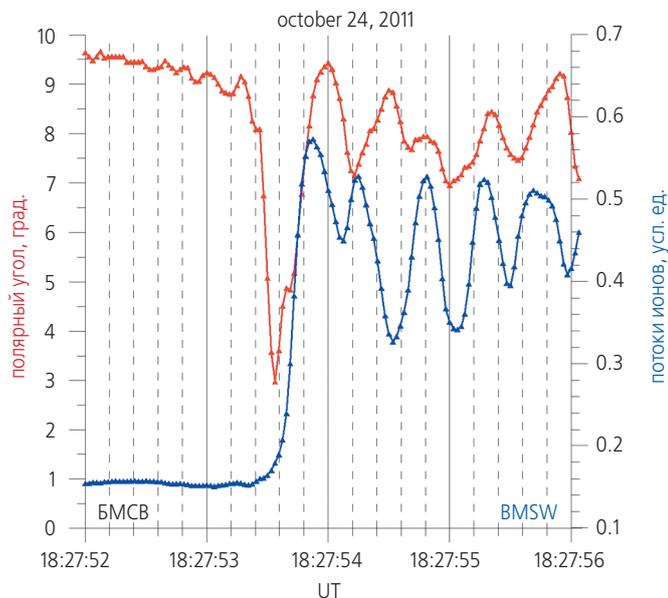


рисунок 12. Пример фронта МУВ

Видно, что резкое возрастание потока ионов солнечного ветра и резкий поворот этого потока происходят за время около 0.2 с. Прибор также регистрирует большие и постепенно затухающие квази-гармонические колебания величины потока и полярного угла с пе-

риодом около 0.4 с за фронтом МУВ, что, по нашим данным, является весьма типичной картиной.

На довольно высокой статистике (более 30 МУВ, зарегистрированных прибором БМСВ) впервые была проведена оценка толщины их фронтов, которая составила от 50 до 500 км при средней ее величине около 200 км. Эта величина близка по порядку к значению гирорадиуса протонов, вычисленному для тепловой скорости ионов перед фронтом МУВ.

Еще одним интересным обстоятельством, выявленным в наших измерениях (*Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др., 2013*), явилось обнаружение довольно быстрых вариаций относительного содержания двукратно ионизованных ионов гелия (альфа-частиц) – второй по обилию после протонов ионной компоненты в солнечном ветре. Прибор БМСВ благодаря высокому энергетическому разрешению мог выделять ионы гелия, используя селекцию частиц по энергии на единицу заряда, которая у альфа-частиц в два раза больше, чем у протонов. Оценки содержания ионов гелия делались во множестве прежних экспериментов, но временное разрешение этих оценок было, как правило, не меньше нескольких минут. В наших же измерениях величина содержания ионов гелия в солнечном ветре определялась с разрешением в 3 с.

На рисунке 13 приведен довольно типичный пример 40-минутного интервала измерений, на котором относительное содержание ионов гелия менялось очень сильно – от 2.5% до 8%. Точки на этом графике стоят через 3 с.

Видно, что весьма большие изменения содержания гелия временами могут происходить так быстро, как всего лишь за несколько (3–10) секунд.

Если предположить, что эти изменения являются следствием перехода спутника от наблюдения одной струи солнечного ветра, испущенной в одном участке солнечной короны, к другой струе, испущенной уже другим участком короны, то мы придем к заключению, что участки короны, сильно отличающиеся содержанием ионов гелия, могут иметь столь малый размер, как примерно 1000 км, что, конечно, очень немного в масштабах Солнца.

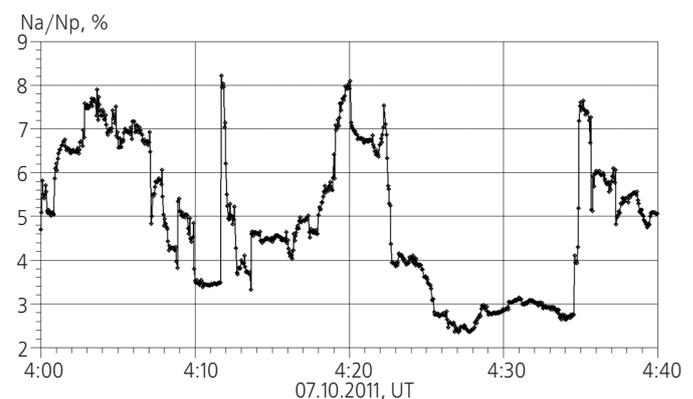


рисунок 13. Быстрые вариации содержания гелия

заключение

Представленный выше краткий обзор результатов и указанные в ссылках многочисленные публикации по этой тематике дают основание заключить, что систематические эксперименты по изучению солнечно-земных связей, успешно проведенные на протяжении последних четырех десятилетий с использованием серии космических аппаратов, созданных в НПО имени С.А. Лавочкина, позволили получить множество важных и приоритетных сведений о плазме солнечного ветра и, в первую очередь, о быстропротекающих процессах, определяющих ее динамику.

Это позволяет существенно продвинуться в части понимания структуры и свойств разреженной бесстолкновительной плазмы, возможность непосредственного изучения которой предоставила нам межпланетная среда, и которую очень трудно (или невозможно) получить другим путем.

В заключение авторы сердечно благодарят своих многочисленных коллег в ИКИ РАН и НПО имени С.А. Лавочкина за неоценимую помощь и содействие в подготовке и проведении экспериментов, результаты которых описаны в данной статье.

список литературы

Агафонов Ю.И., Войта Я., Триска П., Храпченков В.В. // Субспутники проекта «ИНТЕРБОЛ» // Космические исследования. 1996. Т. 34, № 4. С. 371-380.

Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. и др. Потоки тяжелых ионов в солнечном ветре и их использование для диагностики солнечной короны // Исследования солнечной активности и космическая система «ПРОГНОЗ». М.: Наука, 1984. С. 73-80.

Вайсберг О.Л., Камбу Ф., Застенкер Г.Н. и др. Регистрация на орбите Земли плазмы от солнечных вспышек в августе 1972 года // Проблемы солнечной активности и космическая система «ПРОГНОЗ». М.: Наука, 1977. С.155-174.

Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г. и др. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космические исследования. 2007. Т. 45, № 6. С. 489-498.

Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н. и др. Вариации гидродинамических параметров протонов и альфа-частиц солнечного ветра по измерениям на спутнике «ПРОГНОЗ-7» // Космические исследования. 1990. Т. 28, № 2. С. 218-225.

Застенкер Г.Н. Исследования по солнечно-земной физике, выполненные с помощью КА, созданных в НПО им. С.А. Лавочкина. Часть 1. Проект «ИНТЕРБОЛ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 24-38.

Застенкер Г.Н. Исследования по солнечно-земной физике, выполненные с помощью КА, созданных

в НПО им. С.А. Лавочкина. Часть 2. Проект «ИНТЕРШОК» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 5. С. 4-11.

Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З. и др. Изучение тонкой структуры ударных волн с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ // Космические исследования. 1986. Т. 24, № 2. С.151-165.

Застенкер Г.Н., Далин П.А., Лазарус А.Дж. и др. Сопоставление параметров солнечного ветра, измеренных одновременно на нескольких космических аппаратах // Космические исследования. 1998. Т. 36, № 3. С. 228-240.

Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М., Петрукович А.А., Чесалин Л.С. и др., Эксперимент «ПЛАЗМА-Ф» – первые результаты работы // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 3. С. 22-27.

Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 2. С.1-12.

Зеленый Л.М., Долгоносков М.С., Григоренко Е.Е., Сово Ж.А. Универсальные закономерности неадиабатического ускорения ионов в токовых слоях // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 85, вып. 4. С. 225-231.

Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А. и др. Эксперимент «ПЛАЗМА-Ф» на спутнике «СПЕКТР-Р» // Космические исследования. 2013. Т. 51, № 2. С. 83-87.

Ковражкин Р.А., Долгоносков М.С., Сово Ж.А. Скейлинг энергии ионных пучков в низковысотном пограничном плазменном слое // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95, вып. 5. С. 258-262.

Котова Г.А., Грингауз К.И., Безруких В.В. и др. Зависимость скорости солнечного ветра от расстояния до гелиосферного токового слоя по данным спутника «ПРОГНОЗ-9» // Космические исследования. 1987. Т. 25, № 1. С.93-102.

Кремнев Р.С., Смирнов А.И., Горкин С.С. Краткое описание космического аппарата Прогноз-М2 в проекте «ИНТЕРБОЛ» // Космические исследования. 1996. Т. 34, № 4. С. 363-370.

Cambou F., Vaisberg O., Espagne H. et al. Characteristics of interplanetary plasma near the Earth observed during the solar events of August 1972 // Space Research. 1975. V. 15. P. 461.

Kovrazhkin R.A., Sauvaud J.A. Energy dispersed auroral structures from magnetotail ion beams, in Auroral phenomena and Solar-terrestrial relations // CAWSES Handbook-1, Boulder, 2004. P. 165-171.

Lutsenko V.N., Gavrilova E.A. Properties and the origin of Almost Monoenergetic ion (AMI) beams observed near the Earth's bow shock // Ann. Geophys. 2011. V. 29. P. 1439-1454.

Статья поступила в редакцию 06.05.2015 г.