

Новости о солнечном ветре

Г.Н.Застенкер

Солнечный ветер, постоянно существующий в межпланетной среде поток плазмы из короны Солнца, весьма изменчив во времени и очень важен по своему значению — это один из основных агентов, переносящих к Земле многие возмущения, которые возникают на Солнце. Он служит объектом систематического изучения уже более полувека, однако до сих пор в этой теме можно найти много нового и интересного.

В ИКИ РАН первые измерения характеристик солнечного ветра были выполнены «по дороге» на нескольких советских планетных миссиях, направлявшихся к Венере и Марсу. Регулярными такие эксперименты стали начиная с 1972 г. — с запуска высокоэллиптических спутников серии «Прогноз», имевших апогей орбиты на расстоянии от Земли более 170–200 тыс. км. Что же важного мы смогли узнать о предмете?

Портрет явления

К началу наших систематических исследований солнечного ветра уже были известны некоторые результаты подобных измерений, полученных на американском аппарате «Mariner-2» в 1962 г. Однако нам «повезло»: наши эксперименты 1972 г. столкнулись с экстремальными, ранее не наблюдавшимися условиями в межпланетной среде. Но прежде всего надо напомнить, о каких, собственно, условиях пойдет речь.



Георгий Наумович Застенкер, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экспериментального исследования солнечного ветра ИКИ РАН. Область научных интересов — физика космической плазмы и солнечно-земные связи.

Поток солнечного ветра состоит из электронов, протонов и двукратно ионизованных ионов гелия (альфа-частиц); примесь ионов более тяжелых элементов совсем невелика (на уровне 0.01% и менее).

Состояние плазмы описывается целым набором параметров: плотностью (обычно это 1–20 част./см³), переносной скоростью (как правило, она лежит в пределах 300–600 км/с), температурой (в энергетических единицах она составляет 1–10 эВ для ионов и в три-четыре раза больше для электронов). В ней могут возбуждаться разного вида волны — звуковые и сверхзвуковые (в частности, ударные волны, взаимодействие которых с магнитосферой Земли становится причиной различных возмущений). Надо еще подчеркнуть, что плазма солнечного ветра несет с собой межпланетное магнитное поле (как остаток солнечного поля).

Чтобы зарегистрировать необходимый объем физической информации, спутник должен быть снабжен разнообразным оборудованием. Например, в комплекс научных приборов спутника «Прогноз-10-Интеркосмос» (рис.1) 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 полей и потока ионов плазмы с обработкой спектров на борту;

- трехкомпонентный магнитометр;

- комплекс приборов для измерения потоков, энергетических спектров и анизотропии ускоренных ионов и электронов в диапазоне энергий от десятков килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт;

- рентгеновский фотометр для измерения всплесков солнечного излучения;

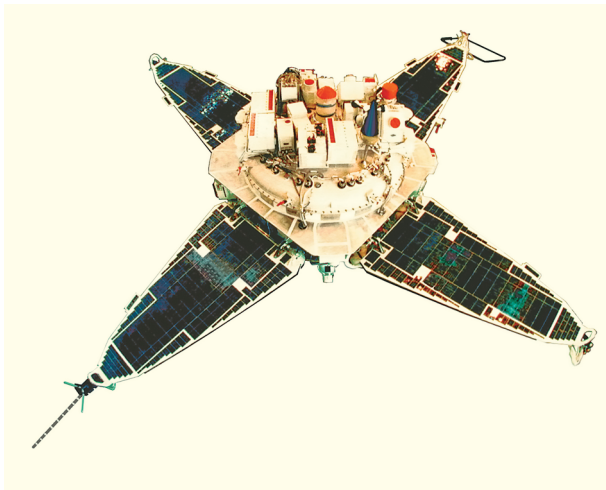


Рис.1. Спутник «Прогноз-10-Интеркосмос» с установленной на нем аппаратурой проекта «Интершок» (она видна вместе с солнечными батареями на верхней плоскости спутника).

- анализатор километрового радиоизлучения Солнца;
- бортовая вычислительная машина с большой кольцевой памятью для организации быстрых измерений при пересечении спутником резких границ (например, ударной волны).

Пример экстремальной ситуации

Но вернемся в 1972 г. Волею случая в августе на Солнце произошли последовательно четыре экстремальные вспышки, составлявшие в баллах от двух до четырех (две вспышки 2 августа, затем по одной 4 августа и 7 августа) и давшие начало сильным межпланетным ударным волнам (МУВ), которые достигли орбиты Земли 4 и 8 августа [1].

Эти межпланетные ударные волны (и параметры плазмы солнечного ветра после их прохождения) были успешно зарегистрированы аппаратурой отечественных высокоапогейных спутников «Прогноз» и «Прогноз-2» [1, 2], запущенных как раз в 1972 г., а также американских космических аппаратов «Pioneer-9» и «Pioneer-10». Что же показали измерения?

Прежде всего отметим заметные различия в средней скорости движения этих ударных волн. Если для первой эта скорость составляла около 900 км/с, а для второй и четвертой — ~1300 км/с, то для третьей она достигла 2900 км/с (это, по-видимому, связано с тем, что данная МУВ двигалась по межпланетной среде, плотность которой заметно снизилась после пробегания первой и второй МУВ).

На рис.2 представлена картина изменения переносной скорости, температуры и плотности ионов солнечного ветра в виде среднечасовых значений этих параметров для периода 4—12 ав-

густа 1972 г. Обращают на себя внимание экстремальные значения параметров ветра:

- увеличение плотности до 150 см^{-3} вскоре после прихода ударных волн от первой и второй вспышек;

- возрастание температуры ионов выше 10^6 К на очень узком интервале времени после прихода ударной волны от третьей вспышки;

- рост переносной скорости ветра выше 1700 км/с (это среднечасовое значение, а на отдельных временных интервалах в течение этих четырех часов она достигала почти 2000 км/с — величины, никогда ранее не наблюдавшейся) также после прихода ударной волны от третьей вспышки.

Анализ полученных данных говорит о довольно сложной детальной структуре вспышечного потока плазмы (включающей в себя ударный слой, «магнитную» область, плазменный поршень с обратной ударной волной и хвостовую часть потока) и о своеобразии его энергетических характеристик [1, 2]. По нашим измерениям были сделаны оценки энергии и массы, переносимых за ударными волнами. Для энергии были получены значения $(3-26) \cdot 10^{32}$ эрг (минимальное для четвертой, а максимальное для суммы волн от первой и второй вспышек), а для массы, соответственно, $(4-60) \cdot 10^{16}$ г. Эти оценки значительно превосходили максимальные значения для всех прежних наблюдений.

Таким образом, сильные солнечные вспышки в августе 1972 г. отметились рекордными значениями параметров солнечного ветра, превышающими и наблюдавшимися ранее, и зарегистрированные позднее, вплоть до настоящего времени.

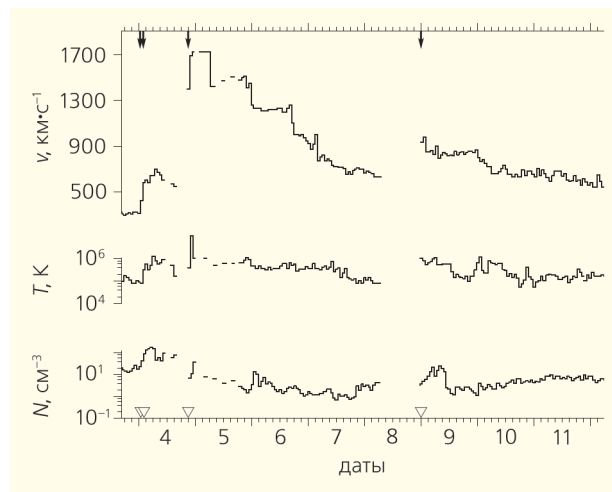


Рис.2. Среднечасовые значения параметров солнечного ветра (сверху вниз: скорость, температура, концентрация) в период 4—12 августа 1972 г. по данным спутников «Прогноз» и «Прогноз-2». Стрелками вверху отмечены моменты прихода межпланетных ударных волн от четырех сильных солнечных вспышек.

Ударные волны на границе магнитосферы

После успешно проведенного изучения событий в солнечном ветре, связанных с экстремальными солнечными вспышками, сотрудники ИКИ РАН и их чехословацкие коллеги подготовили и осуществили большой совместный проект «Интершок». Он был нацелен на исследование тонкой структуры околосолнечной ударной волны, образующейся при взаимодействии солнечного ветра с магнитосферой Земли (так называемое «набегание»). Методически эту задачу было решить нелегко, так как требовалось детально измерить как можно большее количество физических параметров плазмы, магнитного поля и энергичных частиц при весьма быстром (за несколько минут или даже за доли минуты) пересечении спутником фронта околосолнечной ударной волны. Предпринятые усилия помогли справиться с трудностями, и проект «Интершок» был успешно осуществлен сначала в виде подготовительных экспериментов на спутнике «Прогноз-8» (1981), а затем и в полномасштабном качестве на уже упоминавшемся спутнике «Прогноз-10-Интеркосмос» (1985) [3].

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. Так, на рис.3 показано, какие динамические спектрограммы потока ионов солнечного ветра зарегистрировали три разнонаправленных анализатора, когда спутник пересек околосолнечную ударную волну. Здесь степень почернения линий пропорциональна плотности потока ионов, и весь интервал графика занимает примерно одну минуту. Показаны энергетические спектры потока протонов, а над ними — спектры

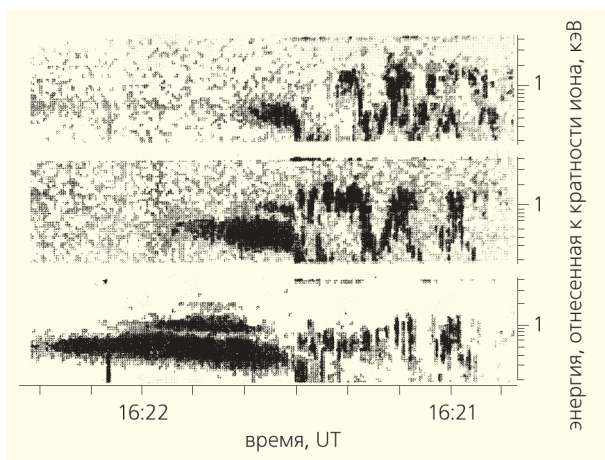


Рис.3. Энергоспектрограммы показаний трех разнонаправленных анализаторов потоков ионов при пересечении околосолнечной ударной волны (около 16:21:30 UT). Степень почернения линий пропорциональна величине потока.

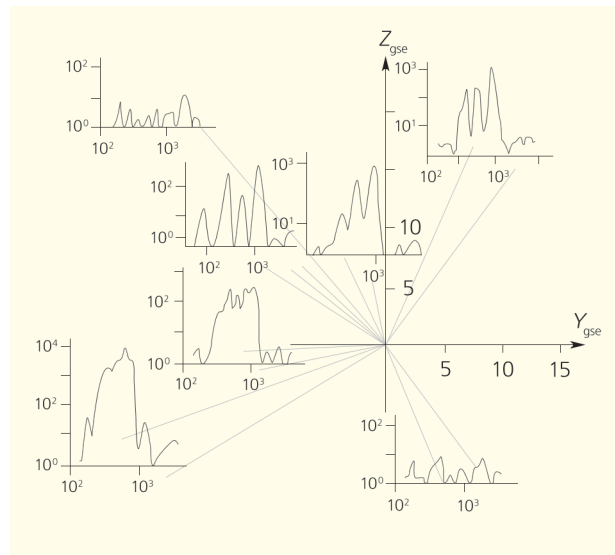


Рис.4. Энергетические спектры потока ионов, наблюдаемые в разных направлениях сразу же за фронтом ударной волны.

альфа-частиц. Фронт ударной волны пересекается примерно в 16:21:30 UT. Видны торможение потока ионов перед фронтом и дискретные пучки ионов в широкой области энергий сразу за фронтом. Это необычное явление — разбиение функции распределения при прохождении фронта на отдельные пучки — было обнаружено впервые именно в данном эксперименте. При дальнейшем продвижении потока ионов по магнитослою функция распределения через 40–50 с сглаживается, и наблюдается более-менее гладкое ее ядро. Пространственная картина потока плазмы также полностью меняется. Пример наблюдения энергетических спектров ионов в семи различных направлениях (т.е. семью разнонаправленными анализаторами) сразу же за фронтом ударной волны приведен на рис.4. Здесь проявляется весьма сложная картина многопиковых энергетических спектров, различных в разных направлениях и существенно отличающихся от типичного двухпикового (протоны и альфа-частицы) спектра невозмущенного солнечного ветра.

По данным плазменных измерений и детектирования вариаций магнитного поля в структуре околосолнечной ударной волны можно выделить следующую последовательность областей (двигаясь 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;
- узкий (порядка 1 с) участок резкого скачка магнитного поля («рамп»), где функция распре-

ления ионов разбивается на отдельные пучки или сгустки во всем диапазоне углов и энергий;

— весьма протяженная (несколько минут) зона постепенной релаксации пучков и сглаживания функции распределения ионов.

Такая картина структуры околоземной ударной волны была получена впервые именно в проекте «Интершок» и может считаться его основным результатом.

Характеристики компонент

Перейдем теперь к детальному рассмотрению поведения частиц. Селективная регистрация протонов и альфа-частиц была осуществлена на спутнике «Прогноз-7» (1978), что позволяло определять их энергетические спектры при любых значениях параметров [4]. По этим данным были изучены соотношения между скоростями и температурами отдельных компонент. Зависимость отношения температур T_α/T_p от разности скоростей $v_\alpha - v_p$ по новым результатам заметно дополнила данные предыдущих измерений (рис.5): отношение температур возрастает при увеличении модуля разности скоростей независимо от знака этой разности, что, очевидно, свидетельствует о преимущественном нагреве альфа-частиц при их смещении относительно протонов.

Особый интерес представляют наблюдения ионов более тяжелых элементов, так как они позволяют самым прямым методом определить химический состав и оценить физическое состояние солнечной короны. При этом, в отличие от основных кинетических параметров солнечного ветра, которые существенно изменяются при его движении от Солнца до орбиты Земли, относительное содержание тяжелых ионов «замораживается» в нижней ко-

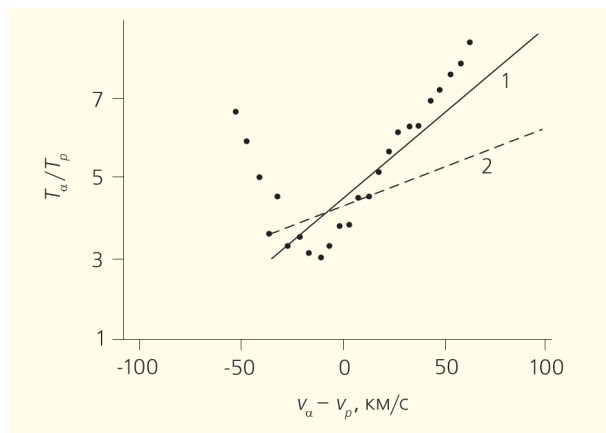


Рис.5. Зависимость отношения температур альфа-частиц и протонов солнечного ветра от разности их скоростей. Приведены данные, полученные на нашем спутнике «Прогноз-7» (точки), американских спутниках IMP6—8 (линия 1) и американском спутнике OGO-5 (линия 2).

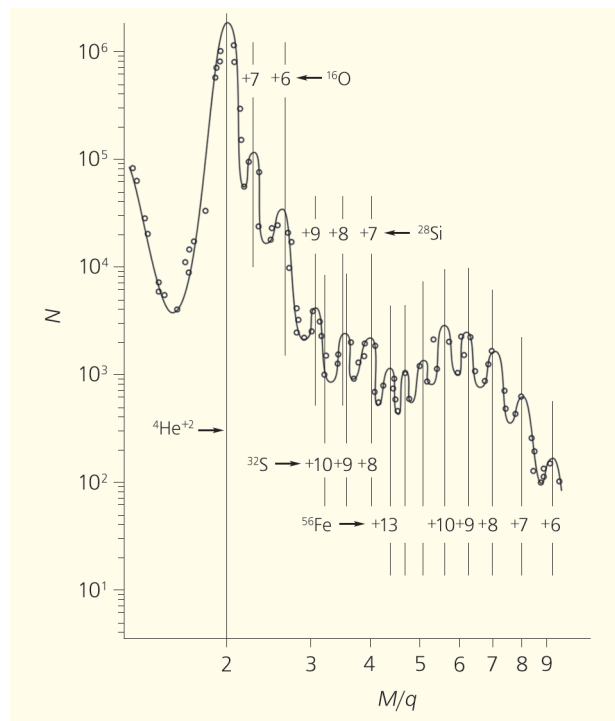


Рис.6. «Массовый» (по отношению массы к заряду) спектр ионов солнечного ветра, синтезированный из шести спектров, которые были измерены за интервал в 40 мин 11 декабря 1978 г. при заметно изменяющейся скорости солнечного ветра. N — число частиц, зарегистрированных за 10 с. Цифры со знаками «+» обозначают заряд иона.

роне Солнца на том уровне, где еще происходят неупругие соударения, и далее при движении в разреженной межпланетной среде остается неизменным. Наиболее информативные данные об этих ионах получаются сейчас с помощью масс-анализа. Но уже в наших ранних измерениях энергетических спектров ионов благодаря высокому разрешению и хорошей чувствительности спектрометра на спутнике «Прогноз-7» удалось в событиях с небольшой скоростью и низкой температурой протонов впервые четко выделить множество дополнительных пиков, принадлежащих ионам более тяжелых, чем водород и гелий, элементов (с различной степенью ионизации) [5]. В предположении (подтвержденном в последующих экспериментах), 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 очень богатого спектра (рис.6) дает самосогласованную картину содержания в солнечном ветре тяжелых ионов, которые с большой вероятностью были идентифицированы как ионы кислорода ^{16}O с ионизацией +7 и +6, ионы кремния ^{28}Si с ионизацией +9, +8 и +7, ионы серы ^{32}S с ионизацией +9, +8 и +7 и многочисленные ионы

железа ^{56}Fe с ионизациями от +13 до +6. При этом относительное (т.е. по отношению к протонам) содержание тяжелых ионов, полученное нами в том событии, составляло около $5 \cdot 10^{-3}$ для кислорода и около 10^{-4} для кремния и железа, что превышало ранее найденные значения.

Высота пиков ионов разной массы и степени ионизации была использована для оценки температуры солнечной короны. В соответствии с имевшимися модельными расчетами из наших данных были получены средние значения этой температуры для разных пар ионов от железа до кислорода: $(0.8-2.8) \cdot 10^6$ К. Они неплохо соответствуют другим результатам и отражают то существенное обстоятельство, что разные ионы действительно «замораживаются» на разных высотах в солнечной короне.

Было получено большое количество таких спектров для периода спокойного солнечного ветра с низкой переносной скоростью (260–310 км/с), низкой температурой протонов и альфа-частиц (2–4 эВ) и высокой концентрацией ионов ($10-30 \text{ см}^{-3}$) в течение четырех суток в декабре 1978 г. Динамика среднечасовых значений плотности тяжелых элементов за этот период обнаруживает их вариации в пределах порядка величины, что не было достаточно четко выявлено в прежних наблюдениях. Однако конкретно связать эти вариации с процессами на Солнце (образованием активных областей или выбросами корональной массы и т.д.) пока не удается. Отметим, что в активных областях с весьма высоким содержанием тяжелых ионов их суммарная энергия может составлять значительную часть (до 30%) от кинетической энергии солнечного ветра.

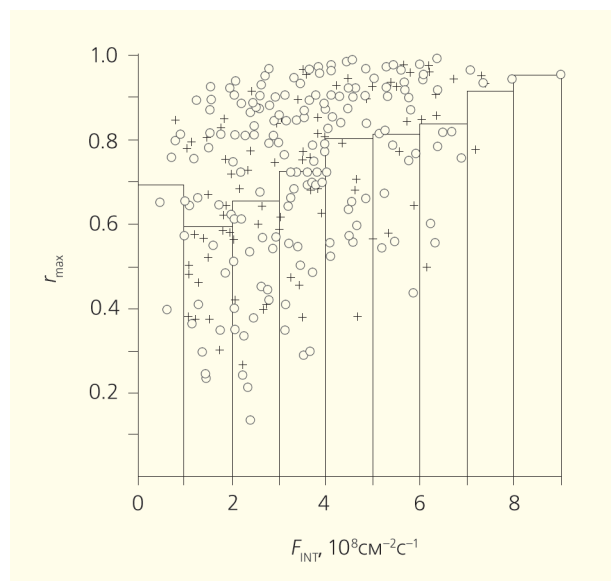


Рис. 7. Коэффициент корреляции r_{\max} потоков ионов солнечного ветра F_{INTV} , измеренных на аппаратах «Интербол-1» и IMP-8 (крестики) и «Интербол-1» и WIND (кружки).

А насколько масштабны эти вариации в пространственном выражении? Результаты систематических измерений на нашем высокоапогейном спутнике «Интербол-1» в 1995–1996 гг. были сопоставлены с одновременными данными по солнечному ветру, полученными на двух американских космических аппаратах — WIND и IMP-8 (Interplanetary Monitoring Platform, платформа для мониторинга межпланетной среды). В качестве количественного критерия соответствия различных измерений на разных аппаратах, сильно разнесенных в пространстве, использовался коэффициент их кросс-корреляции на шестичасовых интервалах [6]. При этом расстояния между аппаратами за рассматриваемый период варьировались от 20 до 200 R_E по оси X_{gsc} и от +35 до $-25 R_E$ по оси Y_{gsc} (напомним, что радиус Земли R_E равен примерно 6370 км; ось X_{gsc} направлена на Солнце, а ось Y_{gsc} перпендикулярна к ней и лежит в плоскости эклиптики).

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

Усредненная по довольно большому ансамблю (более 1400 ч измерений) величина коэффициента кросс-корреляции потоков ионов составила 0.73. Было проанализировано влияние различных факторов на эту корреляцию (скорости и величины потока, расстояния между аппаратами вдоль осей X_{gsc} и Y_{gsc} , величины относительных вариаций потока), и оказалось, что сильнее всего воздействует последний фактор. Корреляция временных рядов измерений скорости солнечного ветра получилась значительно более высокой — до 0.88. Для иллюстрации на рис.7 показана зависимость коэффициентов кросс-корреляции потоков ионов для пар «Интербол-1»–IMP-8 (крестики) и «Интербол-1»–WIND (кружки) от средней по сегменту величины потоков ионов солнечного ветра. Видно, что с ростом средней величины потока корреляция заметно увеличивается. Можно сделать вывод, что большие вариации потоков ионов солнечного ветра отражают наличие достаточно крупномасштабных структур, которые коррелируют и на довольно больших расстояниях между аппаратами.

Солнечный ветер и магнитные бури

Конечно, для жителей нашей планеты важнее всего, как связаны характеристики солнечного ветра с магнитными бурями на Земле. В ИКИ РАН были предприняты систематические исследования такого рода, ведь приходящая к Земле солнечная плазма играет ключевую роль в возбуждении магнитных бурь и суббурь. Последние обычно приписывают появлению в ветре южной ($B_z < 0$) компоненты межпланетного магнитного поля, так как

в этом случае магнитосфера становится открытой для поступления энергии потока частиц внутрь нее. Обычный стационарный солнечный ветер содержит магнитное поле, лежащее в плоскости солнечного экватора, и поэтому не является геоэффективным, только возмущенные типы солнечного ветра могут содержать заметную B_z -компоненту, включая и южную.

Очень выразительна картина, показывающая зависимость интенсивности магнитосферного возмущения (описываемой Dst -индексом) от амплитуды отрицательной компоненты B_z межпланетного магнитного поля для солнечного ветра различных типов, полученная в работе [7] (рис.8). Не вдаваясь в детали этих типов (медленный ветер, быстрый ветер, область сжатия, плазменный поршень за МУВ и т.д.), отметим, что для всех них интенсивность магнитной бури (или суббури) сильнейшим образом (но в разных пределах) возрастает при увеличении амплитуды компоненты $B_z < 0$.

Проведенные исследования показали, что выброс корональной массы из Солнца на орбите Земли представляет собой скрученный жгут магнитных силовых линий (магнитное облако), который может содержать южную компоненту межпланетного магнитного поля. Кроме того, такая компонента может присутствовать и в области сжатия, образующейся при взаимодействии быстрого потока солнечного ветра с ранее испущенным медленным потоком.

Раздельное изучение влияния солнечного ветра различных типов [7] привело к важным следствиям. Во-первых, стало возможным более надежно предсказывать появление магнитосферных возмущений, так как различные структуры ветра обладают южной компонентой магнитного поля с разной вероятностью (т.е. имеют неодинаковую «геоэффективность»). Во-вторых, это позволило исследовать особенности механизмов генерации

бурь и суббурь разными источниками, так как при одной и той же $B_z < 0$ отклик магнитосферы («эффективность процесса») оказывается тем или иным в зависимости от типа источника.

Указанные исследования демонстрируют, что «геоэффективность» выше в магнитных облаках, а «эффективность процесса» оказывается более сильной в слоях сжатия или при взаимодействии быстрого и медленного потоков. Вероятность процесса генерации магнитной бури для корональных выбросов массы и вспышек составляет 40–60%, т.е. лишь немного превышает вероятность случайных процессов. Из этого следует, что прогноз геомагнитных бурь на основании солнечных наблюдений недостаточно надежен, так как может содержать большой процент ложных тревог.

Развитие экспериментов

Новая страница в исследовании солнечного ветра была открыта экспериментом «Плазма-Ф» на спутнике «Спектр-Р», запущенном в 2011 г. Во всех предыдущих наших экспериментах (и в ныне функционирующих зарубежных миссиях) временное разрешение измерений параметров солнечного ветра составляло от нескольких десятков секунд до нескольких секунд. С помощью же нашего плазменного спектрометра БМСВ (быстрый монитор солнечного ветра) [8] на спутнике «Спектр-Р» оно было уменьшено вплоть до 30 мс (!). Другое преимущество этого прибора — способность непрерывно регистрировать направление вектора потока ионов. Это позволило получить качественно новые и важные результаты [9].

Прежде всего был показан струйный характер солнечного ветра: поток ионов на самом деле не однороден, а состоит из отдельных струек с постоянно меняющимся направлением движения. На приведенном графике (рис.9) хорошо видны вариации не только величины, но и полярного и азимутального углов потока с временными изменениями в масштабах примерно от 1 до 5 с. В работе [9] было впервые показано, что частотные спектры флуктуаций потока ионов (рис.10) 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.

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

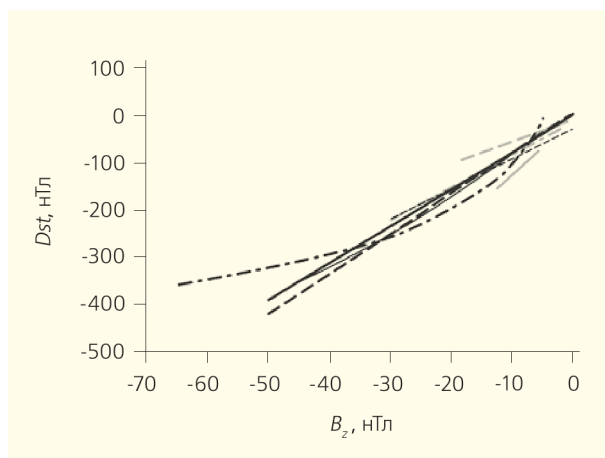


Рис.8. Усредненная зависимость интенсивности магнитосферного возмущения от величины B_z -компоненты межпланетного магнитного поля по данным разных экспериментов.

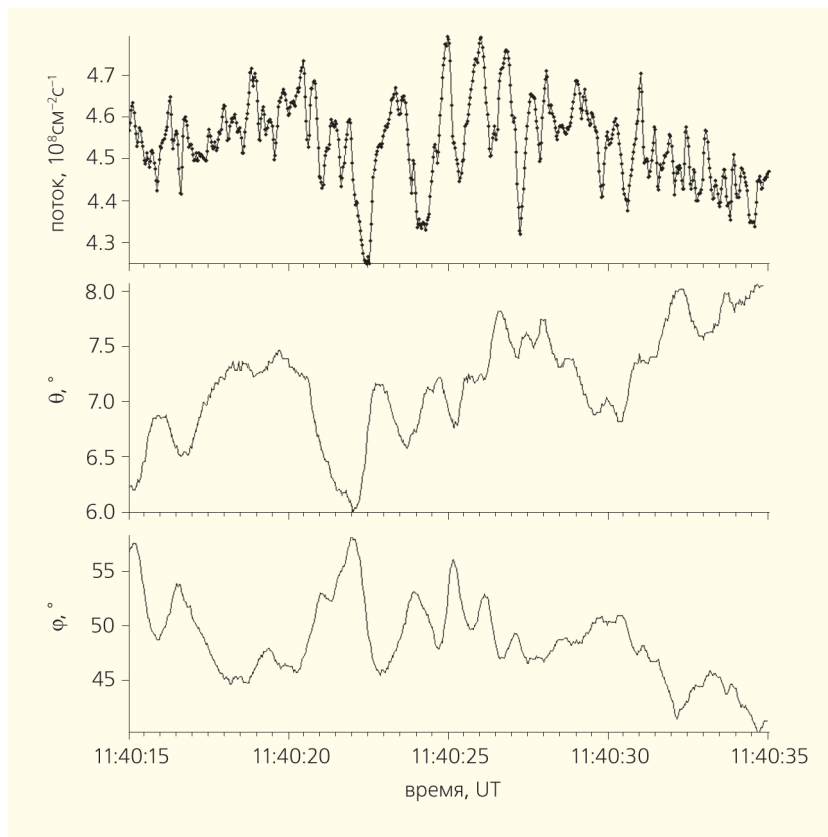


Рис.9. Изменение величины и направления потока ионов солнечного ветра (приведены полярный θ и азимутальный ϕ углы вектора потока).

(рис.11) видно быстрое изменение величины потока ионов и полярного угла его направления: скачкообразное возрастание потока ионов солнечного ветра и резкий поворот этого потока происходят за время около 0.2 с. Прибор также фикси-

рует большие и постепенно затухающие квазигармонические колебания и величины потока, и полярного угла с периодом около 0.4 с. за фронтом МУВ, что, по нашим данным, весьма типично.

На основе довольно высокой статистики (несколько десятков МУВ, зарегистрированных прибором БМСВ), впервые была проведена оценка толщины фронтов МУВ, которая составила от 50 до 500 км при средней их величине около 200 км. Эта величина близка по порядку к значению гирорадиуса (радиуса вращения протонов в магнитном поле солнечного ветра), вычисленного для тепловой скорости ионов перед фронтом МУВ.

Еще одним интересным обстоятельством, выявленным в наших измерениях [9], стало обнаружение довольно быстрых вариаций относительного содержания альфа-частиц — второй по обилию после протонов ионной компоненты в солнечном ветре. Прибор БМСВ благодаря своему высокому энергетическому разрешению мог выделять ионы гелия, используя селе-

кцию частиц по энергии на единицу заряда (у альфа-частиц это отношение в два раза больше, чем у протонов). Оценки содержания ионов гелия проводились во множестве прежних экспериментов, но временное разрешение этих оценок было,

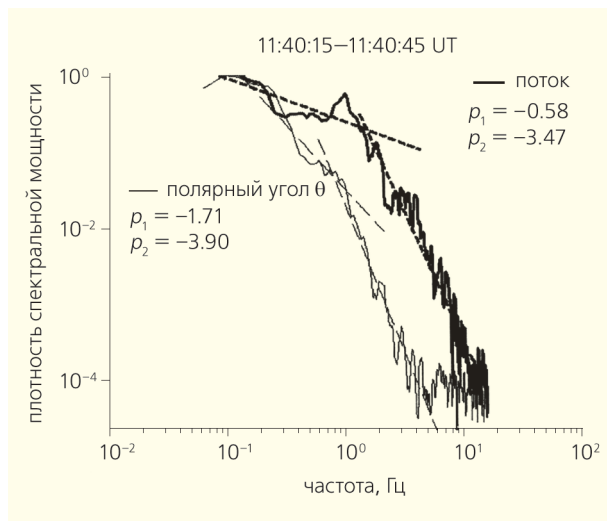


Рис.10. Частотные спектры величины и полярного угла вектора потока ионов солнечного ветра.

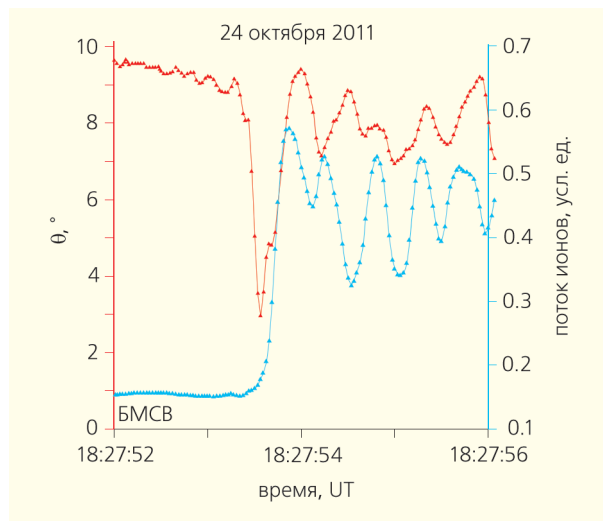


Рис.11. Регистрация изменений величины вектора потока ионов и его полярного угла при прохождении фронта МУВ.

как правило, не лучше нескольких минут. В наших же измерениях величина содержания ионов гелия в солнечном ветре определялась постоянно с периодичностью в 3 с.

На рис.12 приведен довольно типичный пример результатов, полученных за 40-минутный интервал измерений в солнечном ветре, 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 существенные вариации содержания гелия временами могут происходить очень быстро — всего лишь за несколько (3—10) секунд.

Если предположить, что эти изменения суть следствие перехода спутника от наблюдения одной струи солнечного ветра, испущенной в одном участке солнечной короны, к другой струе, испущенной уже иным ее участком, то мы приходим к заключению: сильно различающиеся содержанием ионов гелия участки короны могут иметь столь малый размер, как ≈ 1000 км (в масштабах Солнца это, конечно, очень малая величина).

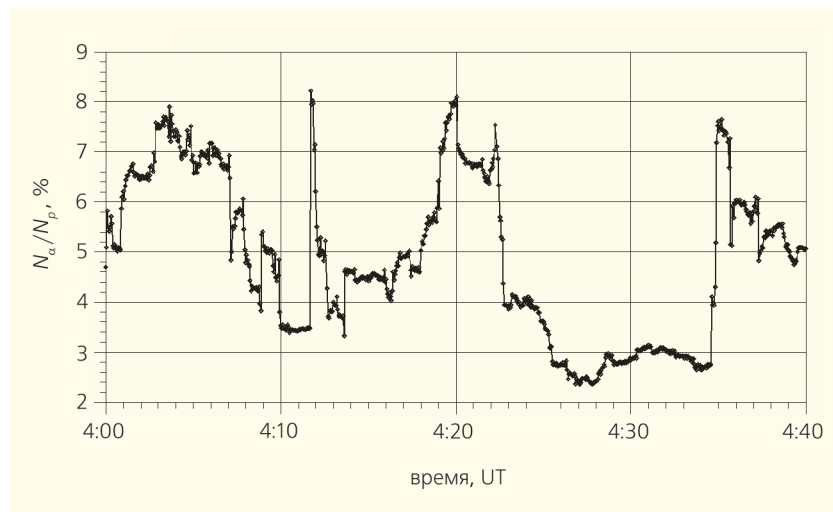


Рис.12. Временные вариации содержания альфа-частиц по отношению к протонам в солнечном ветре.

Здесь мы смогли коснуться лишь небольшой части новых и важных сведений, которые получены в ИКИ РАН на протяжении последних четырех десятилетий. Интенсивное экспериментальное изучение солнечного ветра с борта различных отечественных космических аппаратов, обработка и интерпретация полученных данных успешно продолжаются и сейчас. ■

Литература

1. Вайсберг Л., Камбу Ф., Застенкер Г. и др. Регистрация на орбите Земли плазмы от солнечных вспышек в августе 1972 г. // Проблемы солнечной активности и космическая система «Прогноз». М., 1977. С.155—174.
2. 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.
3. Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З. и др. Изучение тонкой структуры ударных волн с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ // Космич. исслед. 1986. Т.24. №2. С.151—165.
4. 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» // Космич. исслед. 1990. Т.28. №5. С.218—225.
5. 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., 1984. С.73—80.
6. Застенкер Г.Н., Далин П.А., Лазарус А. Дж. и др. Сопоставление параметров солнечного ветра, измеренных одновременно на нескольких космических аппаратах // Космич. исслед. 1998. Т.36. №3. С.228—240.
7. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лоджина И.Г. и др. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям // Космич. исслед. 2007. Т.45. №1. С.3—11; №6. С.489—498.
8. Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. 2013. Т.51. №2. С.1—12.
9. Зеленый Л.М., Застенкер Г.Н., Петрукович А.А. и др. Эксперимент «Плазма-Ф» на спутнике «Спектр-Р» // Космич.исслед. 2013. Т.51. №2. С.83—87.