

На правах рукописи

ЕРМОЛАЕВ Юрий Иванович

Экспериментальное изучение  
крупномасштабной структуры  
солнечного ветра

(Специальность 01.03.03 – Физика Солнца)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва

2002

Работа выполнена в Институте космических исследований  
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук И.С. Веселовский (НИИЯФ МГУ),

доктор физ.-мат. наук С.А. Гриб (ГАО РАН),

доктор физ.-мат. наук К.Г. Иванов (ИЗМИРАН)

Ведущая организация:

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН)

Защита состоится 26 ноября 2002 г. в \_\_ часов на заседании  
Диссертационного совета Д 002.113.03 Института космических  
исследований РАН по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная  
ул., 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ  
РАН, а также на официальном веб-сайте ИКИ РАН по адресу:  
<http://www.iki.rssi.ru>

Автореферат разослан " \_\_ " \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.03

доктор физ.-мат. наук

Г.Н. Застенкер

Настоящая работа посвящена описанию результатов экспериментального исследования свойств плазмы и магнитного поля солнечного ветра с помощью научной аппаратуры, установленной на высокоапогейных спутниках Земли. В работе также рассматриваются физические явления в солнечной атмосфере и межпланетной среде и их влияние на магнитосферу Земли.

## Общая характеристика работы

### Актуальность проблемы

Сверхзвуковой поток плазмы, образующийся в результате постоянного расширения горячей солнечной короны в межпланетное пространство и заполняющий гелиосферу, получил название "солнечный ветер". И хотя прямые исследования солнечного ветра с помощью советских и американских космических аппаратов начались более 40 лет назад (на советской ракете *ЛУНА 2* в 1959 г. и на американских космических аппаратах *Explorer 10* в 1961 г. и *Mariner 2* в 1962 г.), всестороннее изучение солнечного ветра было и остается актуальным по целому ряду причин.

Прежде всего необходимо отметить, что теоретические основы нашего понимания процессов формирования и динамики солнечного ветра (в гидродинамическом приближении) были заложены Паркером в 1957 г. (см., например, [1, Parker, 1961]). Однако результаты прямых измерений магнитогидродинамических параметров солнечного ветра постоянно ставят новые вопросы, многие из которых остаются открытыми и по сей день. К ним прежде всего относятся физические механизмы, ответственные за нагрев основания короны до температур 1,5-2 млн. градусов и эффективную передачу энергии от короны

к солнечному ветру, а также механизмы, обеспечивающие выход в межпланетное пространство ионов более тяжелых, чем протоны. Таким образом, измерения параметров солнечного ветра, изучение их изменчивости и взаимосвязей между ними способствуют лучшему пониманию фундаментальных вопросов физики солнечной (звездной) атмосферы.

Очень информативными оказались исследования отдельных ионных компонент солнечного ветра. Во-первых, массовый состав солнечного ветра не изменяется в межпланетной среде и поэтому дает непосредственную информацию о химическом составе солнечной атмосферы. Во-вторых, различные ионизационные состояния тяжелых ионов формируются в нижней короне, и при движении ионов в межпланетном пространстве их ионизационные состояния практически не изменяются. Следовательно, степени ионизации тяжелых ионов солнечного ветра оказываются как бы "заморожены", и ионы солнечного ветра несут информацию об условиях в солнечной короне [2, 3, Vane et al., 1968; Hundhausen et al., 1968]. Таким образом, наблюдения в межпланетном пространстве массового и зарядового составов ионов солнечного ветра дают ценную информацию о солнечной атмосфере и вносят существенный вклад в физику Солнца [4, Geiss, 1985].

В отличие от химического и ионизационного составов гидродинамические параметры солнечного ветра претерпевают в межпланетном пространстве ряд динамических изменений (расширение, ускорение, генерация волн и взаимодействие с ними и др.) [7, 8, Альвен и Фельтхаммар, 1967; Арцимович и Сагдеев, 1979]. За счет малого содержания и большого разнообразия масс и зарядовых состояний ионы более тяжелые, чем протоны, могут рассматриваться как пробные частицы при изучении таких динамических процессов. Поэтому результаты

изучения поведения как основных (электронной и протонной) компонент, так и малых ионных составляющих солнечного ветра представляют большой интерес для физики плазмы вообще и физики солнечного ветра в частности [5, 6, Hundhausen, 1972; Neugebauer, 1982].

Хотя параметры солнечного ветра испытывают большие и быстрые вариации, было установлено, что на характерных масштабах от  $\sim 1$  солнечного радиуса (70 тыс. км) до  $\sim 1$  а.е. солнечный ветер структурирован (т.е. содержит распространяющиеся в межпланетном пространстве различающиеся между собой области (или типы течений), внутри которых параметры плазмы и межпланетного магнитного поля изменяются сравнительно мало), и его структура отражает крупномасштабную структуру солнечной короны. Некоторые типы течений могут образовываться уже в межпланетном пространстве при взаимодействии разных типов течений солнечного ветра, и масштабы этих областей, как правило, меньше, чем масштабы течений солнечного ветра, связанные с крупномасштабной структурой солнечной короны. Детальное исследование крупномасштабных течений солнечного ветра и их сравнительный анализ позволяют получить информацию о физических процессах и в солнечном ветре, и в солнечной атмосфере при различных условиях, а также о процессах передачи воздействия от Солнца к Земле посредством различных типов течений солнечного ветра.

Помимо чисто научного интереса, наблюдения солнечного ветра представляют большое практическое значение, так как плазма солнечного ветра является основным агентом, с помощью которого активные процессы на Солнце оказывают влияние на состояние околоземного космического пространства и магнитосферы Земли [9, 10, 11, Rostoker and Faltham-

mar, 1967; Russell et al., 1974; Perreault and Akasofu, 1978]. Изучение динамики геомагнитосферы необходимо для решения как научных, так и практических задач в области космонавтики, радиосвязи, метеорологии и климатологии и тех видов деятельности, которые существенно от них зависят, в частности сельского хозяйства, биологии и медицины. Этот аспект солнечно-земных связей, названный в начале XX века выдающимся ученым А.Л.Чижевским "космической погодой", в последнее время заслуженно пользуется повышенным интересом как у научных работников, так и у представителей многих других специальностей (см., например, сборник статей "Space Weather"[12, 2001], а также труды конференций "Solar Cycle and Space Weather", Vico Equense, Италия [13] и Всероссийской конференции по "Физике солнечно-земных связей", Иркутск [14] , проходивших в сентябре 2001 г., и специальной сессии EGS, Ницца, Франция, 2002 г.).

Цель работы состоит в экспериментальном изучении физических процессов в плазме солнечного ветра, при этом основные акценты делаются на исследовании:

- 1) процессов формирования и свойств крупномасштабных структур в солнечном ветре и их динамики;
- 2) их связи с явлениями как в солнечной короне, так и в земной магнитосфере.

### Новизна работы

В работе приводятся результаты, полученные на протяжении более 20 лет исследований, большая часть которых в свое время была пионерской. К ним относятся:

- 1) вариации химического и ионизационного состава солнечного ветра;
- 2) классификация типов течений солнечного ветра и определение соотношений между гидродинамическими параметрами

протонов и  $\alpha$ -частиц в различных условиях;

3) определение условий в солнечной короне в областях формирования различных типов течений солнечного ветра;

4) влияние различных типов солнечного ветра на состояние околоземного пространства.

### Практическая и научная ценность работы

Полученные результаты о величинах и динамике температуры и химического состава солнечной короны, а также крупномасштабной структуре солнечного ветра, крайне важны для построения физических моделей солнечной атмосферы, в том числе и моделей формирования массового и зарядового составов солнечного ветра и его выхода в межпланетное пространство.

Соотношения между гидродинамическими параметрами протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра, полученные в различных условиях, позволяют исследовать физические механизмы формирования солнечного ветра, динамики его крупномасштабных возмущений, а также механизмы, регулирующие сравнительное поведение различных ионных компонент при различных типах течений солнечного ветра.

Исследованные соотношения между параметрами межпланетной среды в различных типах течений солнечного ветра и геомагнитной активностью позволяют проследить цепочку механизмов, передающих воздействие от солнечных явлений к геомагнитным возмущениям, т.е. закладывают фундамент для практического решения задач программы "Космическая погода".

### Апробация работы

Результаты, вошедшие в диссертацию, были представлены в более чем 100 докладах на различных научных конференциях и семинарах внутри страны и за рубежом:

- на ассамблеях COSPAR (26-й Тулуза, Франция, 1986; 27-й Эспоо, Финляндия, 1988; 28-й Гаага, Нидерланды, 1990; 30-й Гамбург, Германия, 1994; 31-й Бирмингем, Великобритания, 1996; 32-й Нагойя, Япония, 1998; 33-й Варшава, Польша, 2000);

- на ассамблеях IAGA (4-й Эдинбург, Великобритания, 1981; 5-й Прага, ЧССР, 1985; 6-й Эксетер, Великобритания, 1989; 7-й Буэнос-Айрес, Аргентина, 1993; 8-й Уппсала, Швеция, 1997; 9-й Ханой, Вьетнам, 2001);

- на симпозиумах EGS (17-м Эдинбург, Великобритания, 1992; 18-м Вейсбаден, Германия, 1993; 19-м Гренобль, Франция, 1994; 20-м Гамбург, Германия, 1995; 21-м Гаага, Нидерланды, 1996; 22-м Вена, Австрия, 1997; 23-м Ницца, Франция, 1998; 24-м Гаага, Нидерланды, 1999; 25-м Ницца, Франция, 2000; 26-м Ницца, Франция, 2001; 27-м Ницца, Франция, 2002);

- на симпозиумах AGU (осеннем Сан-Франциско, 1996; весеннем Балтимор, 1997; осеннем Сан-Франциско, 1998; весеннем Бостон, 1999; осеннем Сан-Франциско, 1999; весеннем Вашингтон, 2000; осеннем Сан-Франциско, 2000);

- на симпозиумах ESLAB (26-м Килларни, Ирландия, 1992; 27-м Нордвайк, Нидерланды, 1997);

- на симпозиумах Solar Wind (7-м Гослар, Германия, 1991; 8-м Дана Пойнт, США, 1995; 9-м Нантукет, США, 1998);

- на симпозиумах SOHO (1-м Аннаполис, США, 1992; 2-м Марциана Марина, Италия, 1993; 3-м Истес Парк, США, 1994);

- на симпозиумах ICS (3-м Версаль, Франция, 1996; 5-м Санкт-Петербург, Россия, 2000);

- на симпозиумах "Геокосмос" (2-м, Санкт-Петербург, Россия, 1998; 3-м, Санкт-Петербург, Россия, 2000);

- на симпозиумах ИНТЕРБОЛ (Тулуза, Франция, 1997; Хельсинки, Финляндия, 1998; Кошице, Словакия, 1998;



Звенигород, Россия, 1999; Киев, Украина, 2000; Польша, 2001; София, Болгария, 2002);

- на симпозиумах КАПГ (4-м Львов, СССР, 1983; 5-м Самарканд, СССР, 1989);

- на симпозиуме SCOSTEP (Иркутск, СССР, 1985);

- на коллоквиуме COSPAR (Варшава, Польша, 1989);

- на симпозиуме SOLTIP (Либлице, ЧССР, 1991);

- на симпозиуме NSO (16-м Санспот, США, 1995);

- на AGU Chapman Conference (Лонавала, Индия, 2001);

- на симпозиуме SOLSPA (Вико Екуенс, Италия, 2001)

и на некоторых других, а также на семинарах ИКИ РАН, ИЗМИРАН, НИИЯФ МГУ, СиБИЗМИР, СПбУ, АИ ЧСАН (Прага, ЧССР), Карлов Университет (Прага, Чехия), UCLA (Лос-Анджелес, США), MIT (Бостон, США), ISAS (Токио, Япония), DARA (Берлин, Германия).

Личный вклад автора.

Космические эксперименты в виду их сложности могут быть осуществлены лишь большими коллективами. Отдавая должное труду коллег, необходимо отметить, что автор принимал непосредственное участие в разработке идеологии, изготовлении, калибровке на вакуумном стенде и испытаниях научных приборов в Институте, на заводе, на космодроме и управлял экспериментами в ходе космических полетов. На спутнике *Интербол/Хвостовой Зонд* он являлся руководителем эксперимента КОРАЛЛ. Он также участвовал в разработке алгоритмов, создании программ, проведении обработки данных и анализе результатов. Начиная с середины 80-х годов практически во всех опубликованных работах ему принадлежит постановка научной задачи, предложение метода обработки и анализа данных и интерпретация результатов.

# Краткое содержание работы

## Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы, содержит 306 страниц машинописного текста (включая 116 рисунков, 30 таблиц и библиографию из 262 наименований), подготовленного в текстовом редакторе TeX.

Во введении сформулированы проблематика, актуальность и цели исследований крупномасштабной структуры солнечного ветра, приведена общая характеристика работы.

В первой главе содержится обзор теоретических представлений о формировании ионной компоненты солнечной атмосферы, её выходе в межпланетное пространство, динамике солнечного ветра и его влиянии на магнитосферу Земли. Также описываются основные методы прямых измерений и результаты наблюдений, полученных до начала цикла исследований на спутниках *Прогноз-7*, *-8*, *-10*, *-11*, *-12*. В конце этой главы сформулированы основные научные задачи проведенных нами исследований:

- определение средних характеристик солнечного ветра и изучение их вариаций в цикле солнечной активности,
- определение среднего химического состава солнечного ветра и солнечной короны,
- оценка средней ионизационной температуры различных ионных составляющих солнечного ветра,
- изучение изменений МГД параметров, химического состава и ионизационной температуры солнечного ветра и условий, приводящих к их вариациям,
- изучение связи изменений МГД параметров, химического

состава и ионизационной температуры солнечного ветра с различными типами течений солнечного ветра,

- классификация типов течений солнечного ветра,
- изучение закономерностей изменения МГД параметров протонов для различных типов течений солнечного ветра,
- изучение закономерностей относительного изменения МГД параметров  $\alpha$ -частиц для различных типов течений солнечного ветра,
- проверка гипотезы о возможности при определенных условиях вытягивания за счет кулоновского трения малых ионных составляющих основным протонным потоком из солнечной короны в межпланетное пространство,
- определение условий возникновения отклонений от гидродинамического равновесия различных ионных компонент,
- оценка роли кулоновских столкновений в выравнивании скоростей и температур ионных компонент в разных течениях солнечного ветра,
- получение сведений о механизмах формирования состава, ускорения и нагрева ионных компонент в различных типах течений солнечного ветра и их сравнительный анализ,
- определение роли крупномасштабной структуры и динамических процессов солнечной короны и солнечного ветра в задачах "космической погоды",
- исследование геоэффективности различных типов течений солнечного ветра.

Во второй главе приводится описание условий проведения экспериментов, характеристик научной аппаратуры и результатов ее лабораторных калибровок, а также методики обработки и анализа данных экспериментов.

При обработке результатов измерений, выполненных в солнечном ветре на спутниках *Прогноз 7, 8* и *Прогноз-10-Интеркосмос* (проект "Интершок"), *Прогноз 11, 12* ("Хвостовой" и "Авроральный" зонды проекта "Интербол") были сделаны следующие физические предположения, которые в среднем согласуются с результатами других экспериментов:

1) все ионы имеют конвектированные максвелловские распределения частиц по скоростям с изотропной кинетической температурой  $T_i$  и массовой скоростью  $v_i$ ;

2) все ионы, тяжелее  $\alpha$ -частиц, обладают одинаковыми массовыми скоростями, равными массовой скорости  $\alpha$ -частиц;

3) все ионы, тяжелее  $\alpha$ -частиц, имеют кинетические температуры, пропорциональные их массам  $T_i = (M_i/M_p)T_p$ ;

4) потоки всех ионов приходят с одного направления, которое не сильно отличается от направления оси зрения анализатора;

5) гидродинамические параметры потоков всех ионных компонент мало изменяются на временных масштабах 1 - 10 мин.;

6) элементный и зарядовый составы ионной компоненты солнечного ветра сохраняются на временных масштабах  $\leq 1$  ч.

Моделирование работы аппаратуры и ее реальное функционирование в условиях космического полета позволяют сделать вывод, что предложенные физические принципы измерений и технические решения по изготовлению научной аппаратуры, а также методы обработки и анализа измерений позволили провести исследование различных параметров солнечного ветра и успешно решить научные задачи, стоявшие перед

экспериментами.

В третьей главе приводятся результаты, описывающие вариации параметров солнечного ветра и зависимости между гидродинамическими параметрами протонной и  $\alpha$ -компонент солнечного ветра без учета структуры солнечного ветра.

Благодаря анализу данных о среднем солнечном ветре (т.е. без селекции данных по типам течений солнечного ветра) в работе были отчасти подтверждены ранее полученные в других космических экспериментах результаты, но в то же время, благодаря отдельным масс-спектрометрическим измерениям  $\alpha$ -частиц и протонов, достигнуты новые результаты, главным образом по относительному поведению  $\alpha$ -частиц и протонов.

1. Средние значения основных гидродинамических параметров солнечного ветра хорошо согласуются с картиной их долгопериодических вариаций в цикле солнечной активности. В частности, подтверждается возрастание относительного содержания гелия на фазе роста солнечной активности.
2. Относительная концентрация  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  в среднем уменьшается от  $\sim 6\%$  до  $\sim 3\%$  при увеличении величины потока солнечного ветра от  $\sim 1 \cdot 10^8$  до  $\sim 10 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ,
3. Период наблюдений на спутнике *Прогноз 7* пришелся на фазу роста в цикле солнечной активности и характеризуется необычным повышением концентрации ионов в высокоскоростных ( $v_p \geq 550 \text{ км/с}$ ) течениях солнечного ветра. В этом же диапазоне скоростей солнечного ветра наблюдается уменьшение относительной концентрации  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  и разности скоростей  $v_\alpha - v_p$   $\alpha$ -частиц и протонов. Это согласуется с предсказаниями модели эволюции возмущений плотности и скорости

солнечного ветра [15, 16, Eyni and Steinitz, 1977; Веселовский, 1978], из которой следует, что при взаимодействии быстрого течения с более низким относительным содержанием гелия и медленного течения с более высоким относительным содержанием гелия может наблюдаться солнечный ветер, у которого средняя скорость  $\alpha$ -частиц меньше средней скорости протонов.

4. Разность скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношение температур  $T_\alpha/T_p$  в среднем возрастают, соответственно, от  $\sim -5$  до  $\sim +10$  км/с и от  $\sim 1,5$  до  $\sim 5$  при увеличении величины альвеновской скорости от  $\sim 25$  до  $\sim 75$  км/с, при этом в указанном интервале  $v_A$  данные могут быть аппроксимированы следующими выражениями:  $v_\alpha - v_p$  [км/с] =  $(0,26 \pm 0,13) v_A$  [км/с] -  $(9,5 \pm 1,1)$  и  $\lg T_\alpha/T_p = (0,51 \pm 0,08) \lg v_A$  [км/с] -  $(0,31 \pm 0,05)$ . При увеличении альвеновской скорости от  $\sim 75$  до  $\sim 100$  км/с величина  $v_\alpha - v_p$  имеет тенденцию к уменьшению, а  $T_\alpha/T_p$  остается на уровне  $\sim 5$ .
5. В целом отношение температур  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с модулем разности скоростей  $v_\alpha - v_p$   $\alpha$ -частиц и протонов. Зависимость отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от относительной разности скоростей  $X = (v_\alpha - v_p)/w_T$ , где  $w_T$  - средняя тепловая скорость, отличается для солнечного ветра с разным содержанием  $\alpha$ -частиц: для  $n_\alpha/n_p < 0,02$  величина  $T_\alpha/T_p$  возрастает от  $\sim 1,5$  до  $\sim 4,5$  при увеличении  $X$  от  $\sim -1$  до  $\sim +1$ , для  $0,02 \leq n_\alpha/n_p \leq 0,05$  отношение  $T_\alpha/T_p$  возрастает от  $\sim 2$  до  $\sim 6,5$  при увеличении  $X$  от  $\sim -1$  до  $\sim +1$  и для  $n_\alpha/n_p > 0,05$   $T_\alpha/T_p$  уменьшается от  $\sim 7$  до  $\sim 4$  при увеличении величины  $X$  от  $\sim -1,0$  до  $\sim 0$  и возрастает от  $\sim 4$  до  $\sim 10$  при увеличении  $X$  от  $\sim 0$  до  $\sim 1,0$ . Полученные результаты не вполне согласуются с

предсказаниями модели [17, Hernandez and Marsch, 1985] и имеют более сложный характер.

6. Совокупность экспериментальных данных позволяет предложить следующий сценарий возникновения отклонения от термодинамического равновесия различных ионных компонент солнечного ветра. На гелиоцентрических расстояниях  $10\text{--}25 R_{\odot}$ , где по результатам радиопросвечивания наблюдается сильная неоднородность параметров плазмы [18, Яковлев и др., 1987], происходит перемешивание разноскоростных течений плазмы с различным относительным содержанием малых ионных составляющих, в результате образуются течения с неравновесными переносными скоростями [15, 16, Eyni and Steinitz, 1977; Веселовский, 1978]. В среднем в более быстрых течениях солнечного ветра наблюдается более высокое содержание гелия, поэтому в солнечном ветре в среднем наблюдаются более высокие переносные скорости  $\alpha$ -частиц, чем протонов. Наряду с этим механизмом могут действовать и известные механизмы преимущественного ускорения малых ионных составляющих при их взаимодействии с волнами. За счет энергии, заключенной в разности переносных скоростей компонент, происходит наблюдаемое в экспериментах на космических аппаратах *Helios* [19, Marsch et al., 1982] увеличение отношения температур  $T_{\alpha}/T_p$  и уменьшение разности скоростей  $v_{\alpha} - v_p$  с возрастанием гелиоцентрического расстояния. Под действием кулоновских столкновений ионов происходит выравнивание переносных скоростей и кинетических температур различных ионных компонент солнечного ветра. Получены оценки, согласно которым выравнивание скоростей и температур ионных компонент происходит в среднем на

гелиоцентрических расстояниях 7 и 20 а.е., соответственно.

В то же время ряд экспериментов дал противоречивые результаты. Например, данные космических экспериментов *Vela 3* [20, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34, 43* [21, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [22, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [23, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* в области небольших потоков  $(1 - 3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  демонстрируют разные зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$ . Исходя из этого была поставлена задача исследовать эти зависимости отдельно в каждом типе течений солнечного ветра. Для этого сначала было необходимо разработать методику селекции солнечного ветра по крупномасштабным структурам (или типам течений) на основе имеющихся измерений, и эта задача была успешно решена, что подробно описывается в следующей главе.

В четвертой главе формулируется подход к классификации типов течений солнечного ветра на основе распределения видов энергии и химического состава в различных типах течений. Анализ измерений показал, что для идентификации пяти типов течений солнечного ветра по минимальному набору данных достаточно определить скорость, концентрацию, относительное содержание  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  и отношение теплового давления к магнитному давлению (параметр  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ ):

- тип 1 характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 300\text{--}420 \text{ км/с}$ ) и высокой концентрацией ( $n = 15\text{--}50 \text{ см}^{-3}$ ), отношением теплового давления к магнитному  $\beta > 1$  и низкими значениями температуры протонов, относительного содержания гелия и модуля магнитного поля;
- тип 2 характеризуется также низкой скоростью ( $v_p = 270$



- 450 км/с) и средней концентрацией ( $n = 2 - 20 \text{ см}^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , низкими температурой и относительным содержанием гелия и средним магнитным полем;
- тип 3 характеризуется средней и высокой скоростью ( $v_p = 350 - 650 \text{ км/с}$ ) и средней концентрацией ( $n = 2 - 30 \text{ см}^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , средними температурой и магнитным полем и высоким содержанием гелия;
- тип 4 характеризуется высокой скоростью ( $v_p = 450 - 700 \text{ км/с}$ ) и средней концентрацией ( $n = 3 - 30 \text{ см}^{-3}$ ), значениями  $\beta \sim 1$ , высокими значениями температуры и магнитного поля, низким содержанием гелия;
- тип 5 характеризуется высокой скоростью ( $v_p = 500 - 700 \text{ км/с}$ ) и средней концентрацией ( $n = 5 - 30 \text{ см}^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , средними значениями температуры и высокими значениями магнитного поля и содержания гелия.

Величина и различный характер поведения указанных параметров позволяют сопоставить эти пять областей с известной крупномасштабной структурой солнечной короны и ее динамикой:

1. гелиосферный токовый слой (HCS);
2. течения из областей с замкнутыми линиями коронального магнитного поля (из стримеров - CS);
3. течения из областей с открытым магнитным полем (из корональных дыр - CH);
4. солнечный ветер, возмущенный нестационарными явлениями в солнечной короне и межпланетной среде (CIR);

## 5. магнитное облако (течения плазмы, содержащие выброшенное из солнечной короны вещество).

Проведенная селекция по типам солнечного ветра позволила получить распределения параметров и их соотношения в разных типах солнечного ветра, а также сделать заключения о физических условиях в области их формирования на Солнце.

Кроме того, был обнаружен тип б, который характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 300 - 400$  км/с) и крайне низкой концентрацией ( $n = 0,1 - 1,0$  см<sup>-3</sup>), значениями  $\beta < 1$ , средними значениями температуры и высокими значениями магнитного поля и содержания гелия. К сожалению, малая статистика наблюдений данного типа солнечного ветра не позволила подробно исследовать его свойства, как это было сделано для остальных типов течений солнечного ветра.

В пятой главе анализируются вариации параметров солнечного ветра, включая параметры  $\alpha$ -частиц, и зависимости между ними в различных типах течений солнечного ветра. На основе этого анализа получены сведения о схожести и различиях процессов ускорения и нагрева различных ионных компонент в разных структурах солнечной короны и типах течений солнечного ветра. В этой главе также изучается поведение тяжелых ионов в течениях разного типа и оцениваются химический состав и ионизационная температура тех областей солнечной короны, из которых эти течения берут свое начало. В частности, показано, что ионы  $H^+$  наблюдаются в веществе, выброшенном из нижних слоев солнечной атмосферы, где температура составляет порядка тысячи градусов.

### 5.1. Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в различиях потоков массы, импульса и энергии

1. Средний поток массы  $nv_p$  уменьшается с увеличением переносной скорости в стационарных течениях солнечного ветра: от  $10,5 \cdot 10^8$  в HCS до  $3,4 \cdot 10^8$  и  $2,7 \cdot 10^8$  частиц/см<sup>2</sup>с в течениях из корональных стримеров и корональных дыр, соответственно. В возмущенных течениях поток массы составляет  $3,1 \cdot 10^8$  в MC и  $4,2 \cdot 10^8$  частиц/см<sup>2</sup>с в CIR. С учетом длительности и частоты появления разных типов течений измерения показывают, что солнечные потери массы почти равны в разных стационарных течениях и в  $\sim 5$  раз выше, чем в возмущенных типах течений.
2. Средние потоки импульса  $nv_p^2$  равны в стационарных течениях солнечного ветра из корональных стримеров и дыр ( $2,1 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup> с) и возрастают до  $2,6 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup>с в MC,  $3,7 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup>с в CIR и  $6,3 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup>с в HCS.
3. Средние потоки кинетической и тепловой энергии,  $0,5nmv_p^3$  и  $nkT_p v_p$  в возмущенных типах течений и в HCS в 2 - 3 раза выше, чем в стационарных течениях. Тем не менее, потери энергии в течениях из корональных дыр в 2 - 5 раз выше, чем в HCS и в возмущенных типах течений, и в 1,5 - 2 раза выше, чем в течениях из корональных стримеров.
4. Наибольшие отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p / (B^2 / 8\pi)$  наблюдаются в HCS ( $\sim 2$ ), а наименьшие отношения – в MC ( $\sim 0,3$ ). В других типах течений параметр  $\beta$  составляет от 0,5 до 1,0.
5. В MC вклад ионов гелия ( $\alpha$ -частиц) в потоки массы, импульса и энергии может превышать обычные ошибки измерений и оценки параметров, и поэтому его необходимо учитывать при изучении этих течений.

## 5.2. Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в сравнительном поведении протонов и $\alpha$ -частиц

По сравнению поведения протонов и  $\alpha$ -частиц в течениях разного типа СВ могут быть сделаны следующие выводы:

1. Относительное содержание гелия  $n_\alpha/n_p$  коррелирует со скоростью солнечного ветра  $v_p$  в HCS, в течениях из корональных стримеров и корональных дыр и антикоррелирует в CIR и в MC.
2. Относительное содержание гелия  $n_\alpha/n_p$  коррелирует с величиной потока  $nv_p$  и плотностью солнечного ветра  $n_p$  в течениях из корональных дыр и в CIR и антикоррелирует в HCS и в течениях из корональных стримеров и в MC. Тем самым подтверждается предположение [24, Geiss, 1970] о важной роли основного, протонного, потока солнечного ветра в "вытягивании" малых ионных составляющих в межпланетное пространство только из корональных дыр.
3. Различия в зависимости относительного содержания гелия  $n_\alpha/n_p$  от величины потока  $nv_p$  и плотности солнечного ветра  $n_p$  в течениях из корональных дыр и из корональных стримеров показывают, что условия и/или механизмы формирования солнечного ветра в этих областях солнечной короны отличаются друг от друга.
4. Разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  коррелируют со скоростью солнечного ветра  $v_p$  и альвеновской скоростью  $v_A$  в HCS, в течениях из корональных стримеров и корональных дыр, но отношение кинетических температур  $T_\alpha/T_p$  коррелирует только в HCS и в течениях из корональных стримеров и сохраняется приблизительно постоянным в течениях из корональных дыр.

5. Отношение кинетических температур коррелирует с разностью скоростей в HCS, в течениях из корональных стримеров, а также коррелирует с абсолютной величиной разности скоростей в течениях из корональных дыр.
6. Процессы ускорения  $\alpha$ -частиц, по-видимому, близки друг другу в течениях из корональных стримеров и корональных дыр и отличаются в HCS.
7. В отличие от ускорения, процессы нагрева  $\alpha$ -частиц отличаются в течениях из корональных стримеров и корональных дыр, но они могут быть одинаковыми в HCS и в течениях из корональных стримеров.

5.3. Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в поведении химического состава и ионизационной температуры в относительно медленных типах течений СВ

О поведении тяжелых ионов и их параметров были получены следующие результаты:

1. Тяжелые ионы наблюдаются в  $\sim 90\%$  времени, когда условия в солнечном ветре позволяют измерять методом энергоанализа малые ионные составляющие, такие условия выполняются в течениях типа INS(CS), NCDE(HCS) и HAE(SH) и составляют  $\sim 1/3$  полного времени наблюдений в солнечном ветре.
2. На временных масштабах от  $\sim 1$  часа до  $\sim 1$  суток вариации ионизационных температур не превышают 30% (точность метода измерений).
3. Средняя величина ионизационных температур в медленных и среднескоростных ( $v_p \leq 450$  км/с) течениях солнечного

ветра составляет для ионов кислорода  $(2,9 \pm 0,6) \cdot 10^6 K$ , для ионов кремния  $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^6 K$  и для ионов железа  $(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^6 K$ .

4. Вариации среднечасовых значений потоков малых ионных составляющих в несколько раз превышают неопределенность их оценок ( $\sim 60 - 80\%$ ) и примерно одинаковы для разных тяжелых ионов. Временная характеристика изменчивости потоков тяжелых ионов, оцененная по времени спада автокорреляционной функции, составляет в среднем  $\sim 1-3$  часа.
5. На временных масштабах  $\sim 1$  суток содержание ионов гелия, кислорода, кремния и железа уменьшается с ростом полной концентрации (или величины потока) ионов солнечного ветра и изменяется пропорционально для всех малых ионных составляющих. Такое поведение содержания, по-видимому, является результатом суммарного действия двух механизмов: диффузии ионов поперек замкнутых силовых линий коронального магнитного поля (в области коронального стримера) и гидродинамического обтекания этой области высокоскоростными потоками плазмы из областей с открытой конфигурацией коронального магнитного поля.
6. Событие типа НАЕ (с высоким содержанием малых ионных составляющих) может быть вызвано ускорением плазмы с низких высот в корональной дыре или инжекцией корональной массы в области стримера.
7. Среднее содержание малых ионов в медленных и среднескоростных ( $v_p \leq 450$  км/с) течениях солнечного ветра относительно протонов составляет для гелия  $(3,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-2}$

(в среднем по всему интервалу наблюдений оно составило  $(5,4 \pm 3,9) \cdot 10^{-2}$ ), для кислорода  $(6,8 \pm 5,6) \cdot 10^{-4}$ , для кремния  $(8,6 \pm 8,2) \cdot 10^{-5}$  и для железа  $(5,5 \pm 4,9) \cdot 10^{-5}$ , при этом в зависимости от типа течения (в частности, от полной концентрации ионов) содержание может измениться примерно в 3 раза по сравнению со средним. Среднее содержание тяжелых ионов солнечного ветра близко к их содержанию в солнечной короне.

8. В одном из периодов наблюдений методом энерго-масс-анализа (30 апреля 1985 г.) зарегистрировано высокое содержание в солнечном ветре ионов  $He^+$ , которые относительно ионов  $He^{++}$  составили  $(1,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ , при этом были зарегистрированы и обычно наблюдаемые в солнечном ветре многократно ионизованные ионы кислорода, кремния и железа, содержание и зарядовое состояние которых близки к средним значениям этих параметров (содержание  $n(He)/n(H) = (7 \pm 2) \cdot 10^{-2}$ ,  $n(O)/n(H) = (4,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-4}$ ,  $n(Si)/n(H) = (3,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-5}$  и  $n(Fe)/n(H) = (3 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ , ионизационная температура  $T(O) = (2,4 \pm 0,4) \cdot 10^6 K$ ,  $T(Si) = (2,0 \pm 0,2) \cdot 10^6 K$  и  $T(Fe) = (1,8 \pm 0,1) \cdot 10^6 K$ . Кинетические температуры всех ионов были близкими и составили  $\sim 5 \cdot 10^4 K$ . Совокупность экспериментальных данных позволяет предположить, что ионы  $He^+$  из холодной хромосферы вышли в межпланетное пространство без дополнительной ионизации во время мощного выброса корональной массы, породившего поток солнечного ветра с высокой концентрацией ионов ( $\sim 70 \text{ см}^{-3}$ ).

В шестой главе изучается роль структуры и явлений как солнечной короны, так и солнечного ветра в солнечно-земной

физике. В частности показано, что наиболее мощные солнечные явления - солнечные вспышки и выбросы корональной массы - имеют довольно слабую корреляцию с геомагнитными бурями и для практического использования в предсказаниях "космической погоды" требуют дополнительной селекции по геоэффективным параметрам для снижения доли "ложных" прогнозов. В то же время прогнозы на основе прямых наблюдений параметров солнечного ветра более надежны, и наиболее геоэффективными являются магнитные облака и области сжатия как за фронтами межпланетных ударных волн, так и в области взаимодействия разноскоростных течений, которые имеют длительные интервалы, когда межпланетное магнитное поле содержит заметную компоненту, параллельную магнитному диполю Земли.

#### 6.1. Геоэффективность солнечных и межпланетных событий

Анализ 25-летних рядов наблюдений Солнца, солнечного ветра и магнитосферных возмущений подтвердил некоторые из ранее обнаруженных эффектов, таких как корреляция числа солнечных пятен с числом солнечных вспышек и числом магнитных бурь на Земле, а также эффект Russell–McPherron [25], т.е. преимущественное возбуждение магнитных бурь в весенние и осенние месяцы года. Однако представленные нами данные о связи солнечных, межпланетных и магнитосферных возмущений содержат также и новые результаты.

1. Обнаруженная геоэффективность сильных солнечных вспышек может быть частично или полностью отнесена на счет случайных процессов. В пользу последнего свидетельствует отсутствие корреляции между классом солнечной вспышки и силой магнитной бури. Геоэффек-



тивность опубликованных СМЕ выше (в том числе и выше полученного порога для случайных процессов), однако наш анализ гало-СМЕ по наблюдениям на КА *SOHO* за 5 лет привел к заключению, что их эффективность ниже, чем у сильных солнечных вспышек. Отметим, что полученные здесь оценки геоэффективности вспышек и СМЕ также крайне низки для использования в предсказаниях "космической погоды", так как очень велик процент ложных предсказаний. Единственный способ повысить эффективность методики предсказания - это научиться селектировать солнечные события по дополнительным признакам, приводящим к отбрасыванию событий, не обладающих достаточной геоэффективностью. Также важно прогнозировать динамику движения геоэффективного солнечного явления в межпланетной среде, чтобы, с одной стороны, оценить вероятность его попадания в магнитосферу Земли, а с другой стороны, предсказать достаточно точное время распространения от Солнца до Земли.

2. Основными межпланетными источниками средних и сильных магнитных бурь являются МС и CIR, каждый из которых составляют по  $\sim 1/3$  от всех геоэффективных типов СВ, при этом по сравнению со средними бурями доля сильных бурь от МС возрастает и достигает половины всех геоэффективных типов СВ, число бурь от CIR практически не изменяется, а от других типов СВ заметно падает. Наш результат по корреляции магнитных бурь и МС хорошо согласуется с аналогичными данными работы [26, Gosling et al., 1991]. Определенная нами зависимость доли магнитных бурь, возбужденных МС (так же, как и CIR), от фазы солнечного цикла имеет

два максимума за цикл. При этом кривые для бурь от МС и от CIR изменяются в противофазе. В целом же полученная нами зависимость имеет более сложный характер и исследована на протяжении более длинного периода, чем в работе [27, Lindsay et al., 1995].

3. Независимо от типа СВ, приведшего к магнитосферной буре, в межпланетной среде практически всегда наблюдается южная компонента ММП (в GSM-системе координат) величиной от -5 до -15 нТ и длительностью от 1-3 и более часов. Интервалы южной компоненты ММП чаще всего наблюдаются:

- 1) за ударной волной, как изолированной, так и связанной с МС или CIR;
- 2) в области сжатия непосредственно перед телом МС и в CIR;
- 3) в теле МС.

Хотя модели предсказания геомагнитных возмущений на основе измерений СВ и ММП в реальном масштабе времени в передней либрационной точке (например, на космических аппаратах *Wind* (1994) и *ACE* (1997)) носят краткосрочный характер (около получаса), их надежность удовлетворяет практическим критериям [28, Петрукович и Климов, 2000].

## 6.2. Отклик магнитосферы Земли на магнитные облака и "слабый" солнечный ветер

Представленные результаты анализа взаимодействия магнитных облаков и "слабого" (с низкой концентрацией) солнечного ветра с земной магнитосферой по данным

спутников *ИНТЕРБОЛ-1,2* позволяют сделать несколько выводов об отклике магнитосферы на такого рода воздействия.

1. Геоэффективность магнитных облаков, по-видимому, зависит от величины изменения параметров в магнитном облаке. При малых, средних или умеренно больших вариациях параметров плазмы и магнитного поля в облаке реакция магнитосферы такая же, как и при подобного рода изменениях в межпланетном пространстве в отсутствии магнитных облаков, и сильно зависит от предыстории межпланетного магнитного поля:

- после длительного поступления энергии в магнитосферу (при южной ориентации ММП) практически все изменения в давлении солнечного ветра или величине и ориентации ММП могут привести к авроральным активациям, суббурям и магнитным бурям;
- при длительной северной ориентации ММП практически все изменения параметров магнитного облака негеоэффективны и не оказывают заметного влияния на состояние магнитосферы и на геомагнитное поле.

2. Экстремально большие скачки параметров в магнитных облаках (в основном вблизи их границ - ударные волны, передние и задние фронты) могут приводить к необычному поведению магнитосферы:

- сильным и довольно сложным сжатием и деформацией (с большим и непропорциональным смещением границ) магнитосферы относительно обычного положения;
- крупномасштабному колебанию структур геомагнитного хвоста относительно спутника;

- развитию возмущений в плазменном слое, которые приводят к ускорению ионов и электронов и их инжекциям в области полярной шапки.
3. Магнитные облака, вызывающие большое число полярных возмущений, включая суббури, как правило сопровождаются более сильными глобальными возмущениями типа магнитных бурь.
  4. Событие с сильным падением плотности в солнечном ветре 10-12 мая 1999 г. не вызвало заметного изменения геомагнитных индексов, хотя и наблюдалось сильное увеличение размеров магнитосферы.
  5. Поведение магнитосферы Земли при экстремальных условиях в межпланетной среде, наблюдаемых при приходе магнитных облаков, плохо согласуется с существующими статистическими моделями, недостаточно подробно изучено и требует дальнейших исследований.

В заключении сформулированы основные результаты, включенные в диссертацию.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Развито новое научное направление - исследование физических свойств отдельных крупномасштабных ( $0,01 - 1$  а.е.) структур (типов течений) солнечного ветра, а также их связи с солнечной атмосферой и земной магнитосферой.
2. Показано, что для идентификации типов течений солнечного ветра по набору данных из минимального числа параметров достаточно определить скорость, концентрацию,

относительное содержание  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  и отношение теплового давления к магнитному давлению (параметра  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ ), так как в четырехмерном пространстве эти параметры для различных типов течений солнечного ветра занимают 5 определенных областей, которые практически не пересекаются. Эти пять областей отражают происхождение различных типов течений и могут быть однозначно сопоставлены с известной структурой солнечной короны и гелиосферы:

- гелиосферный токовый слой (HCS),
- течения из областей с замкнутыми линиями коронального магнитного поля (из стримеров – CS),
- течения из областей с открытым магнитным полем (из корональных дыр – CH),
- солнечный ветер, возмущенный нестационарными явлениями в солнечной короне и гелиосфере (CIR),
- течения, содержащие выброшенное из солнечной короны вещество (магнитные облака).

3. Сравнение поведения параметров в разных течениях солнечного ветра показало, что процессы ускорения протонов и  $\alpha$ -частиц близки друг другу в течениях из корональных стримеров и корональных дыр и отличаются в HCS. В отличие от ускорения, процессы нагрева  $\alpha$ -частиц отличаются в течениях из корональных стримеров и корональных дыр, но они могут быть одинаковыми в HCS и в течениях из корональных стримеров.

4. Получено, что среднее содержание тяжелых ионов в медленных и среднескоростных ( $v_p \leq 450$  км/с) течениях солнечного ветра относительно протонов составляет для

гелия  $(3,0 \pm 2,8) \cdot 10^{-2}$  (в среднем по всему интервалу наблюдений оно составило  $(5,4 \pm 3,9) \cdot 10^{-2}$ ), для кислорода  $(6,8 \pm 5,6) \cdot 10^{-4}$ , для кремния  $(8,6 \pm 8,2) \cdot 10^{-5}$  и для железа  $(5,5 \pm 4,9) \cdot 10^{-5}$ , при этом в зависимости от типа течения (в частности, от полной концентрации ионов) содержание может измениться примерно в 3 раза по сравнению со средним. Среднее содержание тяжелых ионов солнечного ветра близко к их содержанию в солнечной короне.

5. На временных масштабах от  $\sim 1$  часа до  $\sim 1$  суток вариации ионизационных температур не превышают 30% (точность метода измерений). Средняя величина ионизационных температур в медленных и среднескоростных ( $v_p \leq 450$  км/с) течениях солнечного ветра составляет для ионов кислорода  $(2,9 \pm 0,6) \cdot 10^6 K$ , для ионов кремния  $(1,7 \pm 0,3) \cdot 10^6 K$  и для ионов железа  $(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^6 K$ .
6. Показано, что независимо от типа солнечного ветра, приведшего к магнитосферной буре, в межпланетной среде практически всегда наблюдается южная компонента ММП (в GSM-системе координат) величиной от -5 до -15 нТ и длительностью от 1 - 3 и более часов. Интервалы южной компоненты ММП чаще всего наблюдаются:
  - за ударной волной, как изолированной, так и связанной с магнитным облаком или CIR;
  - в области сжатия непосредственно перед телом магнитным облаком и в CIR;
  - в теле магнитного облака.
7. Полученные корреляции показывают, что выбросы корональной массы и сильные солнечные вспышки лишь в 30-40% случаев приводят к геоэффективным возмущениям

межпланетной среды, которые вызывают геомагнитные бури. Указанная корреляция находится на уровне случайных процессов, и для ее повышения необходимо проводить дополнительную селекцию солнечных возмущений, чтобы использовать в решении задач "космической погоды".

Основные результаты работы изложены в опубликованных работах, список которых приводится ниже.

1. Вайсберг О.Л., Горн Л.С., Ермолаев Ю.И. и др. Эксперимент по диагностике межпланетной и магнитосферной плазмы на АМС "Венера-11, 12" и "Прогноз-7". // *Космич. исслед.*, 1979. Т. 17. N5. С.780-792.
2. Zastenker G.N., Yermolaev Yu.I. Observations of the solar wind stream with high heavy ion abundance and coronal conditions, Препринт ИКИ АН СССР Пр-579. М. 1980.
3. Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Омельченко А.Н. Наблюдения тяжелых ионов в солнечном ветре по данным спутника "Прогноз-7". // *Космич. исслед.*, 1980. Т. 18. N5. С. 761-765.
4. Застенкер Г.Н., Денин А.Б., Ермолаев Ю.И. и др. Интегральный детектор заряженных частиц малой энергии. // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерное приборостроение*, 1981. N2. С. 64-69.
5. Zastenker G.N., Yermolaev Yu.I. Observations of solar wind stream with high abundance of heavy ions and relation with coronal conditions. // *Planetary and Space Science*, 1981. V.29. N 11. P. 1235-1240.

6. Zastenker G.N., Vaisberg O.L., Balebanov V.M., Omeltschenko A.N., Nozdrachev M.N., Yermolaev Yu.I. et al. Dynamics of solar wind plasma parameters and behaviour of magnetosphere boundaries during the arrival of interplanetary shock waves to the Earth in the events of April-May, 1981. Препринт ИКИ АН СССР D-305, М.1982.
7. Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Пинтер С. и др. Наблюдение солнечного ветра с высоким временным разрешением.// *Космич. исслед.*, 1982. Т.20., №6. С.900-905.
8. Zastenker G.N., Borodkova N.L., Vaisberg O.L., Omeltschenko A.N., Yermolaev Yu.I. et al. Interplanetary shock waves in the period after the solar maximum year: observation onboard the Prognoz 8 satellite. Препринт ИКИ АН СССР Пр-841, М. 1983.
9. Yermolaev Yu.I. Ion composition of the solar corona and the interplanetary plasma.//Colloquium on Plasma Physics "Topics Common to the Laboratory and the Space Plasma Research", Horská Kvilda, Publ. MFF UK, Czechoslovakia, 1984. P.1-32.
10. Вайсберг О.Л., Омельченко А.Н., Смирнов В.Н. Застенкер Г.Н., Климов С.И., Федоров А.О., Ноздрачев М.Н., Савин С.П., Ермолаев Ю.И., Лейбов А.В. Изучение взаимодействия солнечного ветра с геомагнитосферой на станциях "Прогноз".// В кн.: Исследование солнечной активности и космическая система "Прогноз", М.: Наука, 1984. С.10-32.
11. Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Омельченко А.Н. Потоки тяжелых ионов в солнечном ветре и их использование для диагностики солнечной короны.// В



кн.: Исследование солнечной активности и космическая система "Прогноз", М.: Наука, 1984. С.73-80.

12. Аванов Л.А., Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И. Наблюдение мелкомасштабной структуры солнечного ветра на фронте резкого возрастания скорости потока плазмы.// *Космич.исслед.*, 1984. Т.22. N5. С.774-780.
13. Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Хамитов Г.П., Любавский К.В., Бородкова Н.Л., Ермолаев Ю.И. и др. Кинетические параметры солнечного ветра по измерениям на спутнике "Прогноз-7" с ноября 1978 года по июнь 1979 года (каталог среднечасовых значений). Препринт ИКИ АН СССР Пр-951, М. 1984.
14. Братищенко В.В., Любавский К.В., Молчан С.И., Ступин В.В., Хамитов Г.П., Аванов Л.А., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И. и др. Пакет прикладных программ статистического анализа и его применение к изучению характеристик межпланетной плазмы. Препринт ИКИ АН СССР Пр-969, М. 1984.
15. Nemecek Z., Safrankova J., Kozak I., ..., Yermolaev Yu.I. et al. Measurement of plasma parameters in solar wind and in shock waves.// *Czechoslovak Journal of Physics*, 1985. V. B 35. P.557-567.
16. Avanov L., Leibov A., Nemecek Z., Safrankova J., Vaisberg O., Yermolaev Yu., Zastenker G. Fast measurement of solar wind parameters by the MONITOR instrument.// In: INTERSHOCK Project, Publ. N 60, Astronomical Institute of Czechoslovak Academy of Sciences, 1985. P.39-59.
17. Bedrikov A., Belikova A., Fedorov A., Fucks V., Hanzal V.,

- Kuzmin V., Leibov A., Namestnik S., Nemecek Z., Notkin V., Richter M., Safrankova J., Vaisberg O., Yermolaev Yu., Zastenker G. Complex of plasma spectrometers BIFRAM.// In: INTERSHOCK Project, Publ. N 60, Astronomical Institute of Czechoslovak Academy of Sciences, 1985. P.113-142.
18. Fischer S., Gavrilova E., Jeres M., ... Yermolaev Yu. et al. Data processing system in the Intershock project.//In: INTERSHOCK Project, Publ. N 60, Astronomical Institute of Czechoslovak Academy of Sciences, 1985. P.330-341.
19. Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З., Шафранкова Я., Федоров А.О., Ермолаев Ю.И. и др. Изучение тонкой структуры ударных волн с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ, // *Космич. исслед.*, 1986. Т.24. N2. С.151-165.
20. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Коган В.Т. и др. Эксперимент по изучению ионного состава солнечного ветра с помощью масс-энергоанализаторов комплекса БИФРАМ, // *Космич. исслед.*, 1986. Т.24. N2. С.192-199.
21. Ермолаев Ю.И. Поведение кинетических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц в зависимости от скорости солнечного ветра, // *Космич. исслед.*, 1986. Т.24. N5. С.725-734.
22. Avakov L., Borodkova N., Nemecek Z., Omeltchenko A., Safrankova J., Skalski A., Yermolaev Yu. et al., Some features of solar wind protons,  $\alpha$ -particles and heavy ions behaviour: the Prognoz 7 and Prognoz 8 experimental results. // *Czechoslovak Journal of Physics*, 1987. V. B 37. P.759-774.
23. Ермолаев Ю.И. Крупномасштабные характеристики ионной компоненты солнечного ветра по результатам наблюдений

на космических аппаратах. Препринт ИКИ АН СССР Пр-1281, М. 1987.

24. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н. и др. Вариации гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра по данным селективных измерений на спутнике "Прогноз-7". Препринт ИКИ АН СССР Пр-1357, М. 1988.
25. Чичагов Ю.В., Коган В.Т., Кошевенко Б.В., Павлов А.К., Соболева Е.В., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Журавлев В.И. Аномально высокое содержание ионов  $He^+$  в солнечном ветре 30 апреля 1985 года по данным наблюдений, полученным с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ на ИСЗ "Прогноз-10-Интеркосмос", Препринт ФТИ им.А.Ф.Иоффе АН СССР Пр-1332, Л. 1988.
26. Belyaeva N.P., Gurin L.S., Yermolaev Yu.I. et al. Solar wind parameters determination based on statistical processing on the Intershock experiment data. // *Czechoslovak Journal of Physics*, 1989. V.B 39, P.408-414.
27. Zastenker G.N., Yermolaev Yu.I., Zhuravlev V.I. et al. Large- and middle-scale phenomena in the interplanetary medium: Prognoz 7,8,10 observations.// *Adv.Space Res.*, 1989. V.9. N 4. P.117-121.
28. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V., Zastenker G.N. et al. Variations of solar wind proton and alpha-particle hydrodynamic parameters: Prognoz 7 observations. // *Adv.Space Res.*, 1989. V.9. N 4. P.123-126.
29. Ермолаев Ю.И., Журавлев В.И., Застенкер Г.Н. и др.

Наблюдения однократно ионизованного гелия в солнечном ветре, // *Космич. исслед.*, 1989. Т.27. N5. С.717-725.

30. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Динамика потоков тяжелых ионов солнечного ветра и некоторых характеристик солнечной короны, // *Космич. исслед.*, 1990. Т.28. N1. С.103-116.
31. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н. и др. Вариации гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра по измерениям на спутнике Прогноз-7, // *Космич. исслед.*, 1990. Т.28. N2. С.218-225.
32. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Stupin V.V. Relationships between bulk parameters of solar wind protons and alpha-particles: PROGNOZ 7 selective measurements. Препринт ИКИ АН СССР Пр-1575, М. 1990.
33. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В. Связь относительного содержания гелия с условиями в солнечном ветре по измерениям на спутнике "Прогноз-7", // *Космич. исслед.*, 1990. Т.28, N4, С.571-580.
34. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V. Some alpha-particle heating and acceleration mechanisms in the solar wind: Prognoz 7 measurements. // *Planet.Space Sci.*, 1990. V.38. N10. P.1305-1313.
35. Ермолаев Ю.И. Новый подход к изучению крупномасштабной структуры солнечной короны по результатам измерения параметров солнечного ветра, // *Космич. исслед.*, 1990. Т.28. N6. С.890-902.
36. Borodkova N.L., Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N. Motion of the strong disturbances in the interplanetary medium.//In:

Physics of the Outer Heliosphere. COSPAR Colloquium, 1990. V.1. P.391-392.

37. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V., Kozak I. Dynamics of proton and alpha-particle velocities and temperatures in the solar wind: Prognoz 7 measurements. // *Adv.Space Res.*, 1991. V.11. N1. P.79-82.
38. Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind and solar corona: Prognoz 7 observations. // *Adv.Space Res.*, 1991. V.11. N1. P.75-78.
39. Zastenker G.N., Avakov L.A., Yermolaev Yu.I. et al. Variability of the coronal structures and ion components in the solar wind. // *Czechoslovak Journal of Physics*, 1991. V.B 41. N10. P.1001-1008
40. Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind and its relationship with solar corona: Prognoz 7 observations. // *Planet. Space Sci.*, 1991. V.39. N10. P.1351-1361.
41. Yermolaev Yu.I. Helium abundance, acceleration and heating and large-scale structure of the solar wind. // In: *Solar Wind Seven*, COSPAR Colloquium, 1992. V.3. P.411-418.
42. Zastenker G.N., Yermolaev Yu.I. Investigation of solar wind heavy ions and proton/alpha-particle relations with Prognoz 7 measurements. // In.: *Proc. 1st SOLTIP Symposium*, eds.S.Fischer and M.Vandas, 1992. V.1. P.318-327.
43. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Badalyan O.G. et al. Types of solar wind streams and their relation to the structure of solar corona. // In.: *Proc. 1st SOLTIP Symposium*, eds.S.Fischer and M.Vandas, 1992. V.2. P.288-293.

44. Yermolaev Yu.I. Mass, momentum and energy transport from the Sun to the Earth by different types of the solar wind: Prognoz 7 observations. // In.: Proc. 26th ESLAB Symposium, ESA SP-346, 1992. P.217-222.
45. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В. Потоки энергии, импульса и массы из Солнца в разных типах течений солнечного ветра по наблюдениям на спутнике "Прогноз-7", // *Космич. исслед.*, 1992. Т.30. N6. С.833-851.
46. Yermolaev Yu.I. Solar wind heavy ions and proton/alpha particle relations observed on board the Prognoz 7 satellite. // In.: Proc. 1st SOHO Workshop, ESA SP-348, 1992. P.339-342.
47. Ермолаев Ю.И. Наблюдения ионов  ${}^4\text{He}^{++}$  в солнечном ветре, // *Космич. исслед.*, 1994. Т.32. N1. С.93-125.
48. Yermolaev Yu.I. Signature of coronal holes and streamers in the interplanetary space. // *Space Sci.Reviews*, 1994. V.70. P.379-386.
49. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N. Differential flow between protons and alphas in the solar wind: Prognoz 7 observations. // *J. Geophys. Res.*, 1994. V.99. N A12. P.23503-23504.
50. Yermolaev Yu.I. Scientific program of solar and solar wind observations: INTERBALL and Relict-2 missions. // Proc. 3rd SOHO Workshop, ESA SP-373, 1994. P.441-444.
51. Yermolaev Yu.I. Scientific program of observations on Solar-Terrestrial Physics on the Relict-2 mission. // In.: INTERBALL mission and Payload, CNES-IKI-RSA, 1995. P.409-410.
52. Ермолаев Ю.И. Скорости и температуры протонов и альфа-частиц в разных типах течений солнечного ветра,

// *Космич. исслед.*, 1995. Т.33. N4. С.381-388.

53. Yermolaev Yu.I. Transport of mass, momentum and energy from the Sun to the Earth by different types of solar wind streams. //ASP Conference series, 1996. V.95. P.288-299.
54. Yermolaev Yu.I. Solar wind helium observations on the Prognoz 7 satellite. // Proc.Solar Wind 8 Conference, AIP Conference Proceedings 382, New York, 1996. P.269-272.
55. Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind as observed on the Prognoz 7 satellite.//Proc.Solar Wind 8 Conference, AIP Conference Proceedings 382, New York, 1996. P.475-478.
56. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V. Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognoz 7 observations. // *J. Geophys. Res.*, 1997. V. 102. N A2, P.2125-2136.
57. Yermolaev Yu.I. INTERBALL observations of the plasma sheet. // *Adv.Space Res.*, 1997. V.20. N4-5. P.983-991.
58. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Borodkova N.L. et al. Magnetic cloud event of 6-11 January, 1997: INTERBALL multi-satellite and multi-instrument observations.// ESA SP-415, 1997. P.155-161.
59. Yermolaev Yu.I. What can we know about processes of formation and dynamics of different types of solar wind on the basis of proton and alpha observations.// ESA SP-415, 1997. P.401-404.
60. Savin S.P., Balan O., Borodkova N.L., Budnik E., ... Yermolaev Yu. et al. INTERBALL magnetotail boundary case study.// *Adv.Space Res.*, 1997. V.20. N4-5. P.999-1015.

61. Yermolaev Yu.I., Fedorov A.O., Vaisberg O.L., Balebanov V.M., Obod Yu.A., Jimenez R., Fleites J., Llera L. Omelchenko A.N. Ion distribution dynamics near the Earth's bow shock: first measurements with the 2-D ion energy spectrometer CORALL on the INTERBALL/Tail-probe satellite.// *Ann. Geophysic.*, 1997. V.15. N5. P.533-541.
62. Эйгес П.Е., Застенкер Г.Н., Ноздрачев М.Н., Ермолаев Ю.И., Шафранкова Я., Немечек З. Быстрые флуктуации потока ионов солнечного ветра и магнитного поля в форшоке: 1. Корреляция параметров.// *Космич. исслед.*, 1998. Т.36. N 3. С.251-260.
63. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Nozdrachev M.N., Skalsky A.A., Zelenyi L.M. Plasma populations in the magnetosphere during the passage of magnetic cloud of 10-11 January, 1997: INTERBALL/Tail Probe observations.// *Geophys.Res.Let.*, 1998. V.25. N14. P.2565-2568.
64. Ермолаев Ю.И. Наблюдения плазменного слоя в проекте ИНТЕРБОЛ. // *Космич.исслед.*, 1998. Т.36. N 3. С.273-281.
65. Николаева Н.С., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Ноздрачев М.Н., Романов С.А., Ермолаев Ю.И., Эйсмонт Н.А. Об источниках и амплитуде движения магнитопаузы,// *Космич. исслед.*, 1998. Т.36. N 6. С.564-575
66. Savin S.P., Borodkova N.L., Budnik E.Yu., Fedorov A.O., Klimov S.I., Nozdrachev M.N., Morozova I.E., Nikolaeva N.S., Petrukovich A.A., Pissarenko N.F., Prokhorenko V.I., Romanov S.A., Skalsky A.A., Yermolaev Yu.I. et al. Interball tail probe measurements in outer cusp and boundary layers.// In:



Geospace Mass and Energy Flow: Results from the International Solar-Terrestrial Physics Program. edited by J.L. Horwitz. D.L. Gallagher and W.K. Peterson. Geophysical Monograph 104. American Geophysical Union. Washington D.C., 1998. P.25-44.

67. Savin S.P., Romanov S.A., Fedorov A.O., Zelenyi L.M., Klimov S.I., Yermolaev Yu.I. et al. The cusp/magnetosheath interface on May 29. 1996:INTERBALL-1 and POLAR observations.// *Geophys.Res.Let.*, 1998. V.25. N15. P.2963-2966.
68. Бадалян О.Г., Вальчук Т.Е., Ермолаев Ю.И., Лившиц М.А. Исследование содержания гелия в низкоскоростных потоках солнечного ветра по данным спутников Прогноз-7.-8. // *Космич. исслед.*, 1999. Т.37. N2. С.143-150.
69. Yermolaev Yu.I., Sergeev V.A., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.- A., Mukai T., Kokubun S. Two spacecraft observation of plasma sheet convection jet during continuous external driving.// *Geophys. Res. Let.*, 1999. V.26. P.177-180.
70. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Borodkova N.L., Kovrazhkin R.A., Nikolaeva N.S., Nozdrachev M.N., Savin S.P., Skalsky A.A., Zelenyi L.M., Nemecek Z., Safrankova J. and Sauvaud J.-A. Statistic study of magnetosphere response to magnetic clouds: INTERBALL multi-satellite observations.// *Physics and Chemistry of the Earth*, 2000. V.25. N1-2. P.177-180.
71. Yermolaev Yu.I., Zelenyi L.M., Mukai T., Sergeev V.A., Borodkova N.L., Kokubun S., Kovrazhkin R.A., Liou K., Meng C.-I., Parks G., Petrukovich A.A. and Sauvaud J.-A. Multi-spacecraft observations of series of substorms on December 22-23. 1996. // *Adv. Space Res.*, 2000. V.25. N 7/8. P.1697-1701.

72. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Николаева Н.С. Реакция магнитосферы Земли на события в солнечном ветре по данным проекта ИНТЕРБОЛ. // *Космич. исслед.*, 2000. Т.38. N 6. С.563-576.
73. Russell C.T., Wang Y. L., Raeder J., Tokar R. L., Smith C. W., Ogilvie K. W., Lazarus A. J., Lepping R. P., Szabo A., Kawano H., Mukai T., Savin S., Yermolaev Y. I., Zhou X.-Y., Tsurutani B. T. The interplanetary shock of September 24. 1998: Arrival at Earth. // *J. Geophys. Res.*, 2000. V.105. N A11. P.25143-25154.
74. Sibeck D. G., Kudela K., Lepping R. P., Lin R., Nemecek Z., Nozdrachev M. N., Phan T.-D., Prech L., Safrankova J., Singer H., Yermolaev Y. Magnetopause motion driven by interplanetary magnetic field variations. // *J. Geophys. Res.*, 2000. V.105. N A11. P.25155-25170.
75. Kawano H., Savin S., Lui A. T. Y., Fujimoto M., Kokubun S., Mukai T., Yamamoto T., Saito Y., Romanov S., Nozdrachev M. and Yermolaev Yu. Solar wind discontinuity - magnetosphere interactions observed by INTERBALL-1 and GEOTAIL: IACG Campaign N2. // *Adv. Space Res.*, 2000. V.25. N 7-8. P.1405-1409.
76. Ермолаев Ю.И. Крупные геомагнитные возмущения и их корреляция с межпланетными явлениями в период работы спутников ИНТЕРБОЛ-1. 2. // *Космич. исслед.*, 2001. Т.39. N 5. С.324-331.
77. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных. межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976-2000 гг. // *Космич. исслед.*, 2002. Т.40. N1. С.3-16.

78. Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Statistical relations between solar. interplanetary and geomagnetic disturbances during 2.3 solar cycles (1976-2000). - ESA SP-477.2002. P.579-582.

Кроме того, некоторые технические детали использованной научной аппаратуры описаны в 8 авторских свидетельствах СССР и 6 авторских свидетельствах ЧССР.

## Список литературы

- [1] Parker E.N. The solar wind, // J.Res.Nat.Bur.Standards, 1961. N 65D. P.537.
- [2] Bame S.J., Hundhausen A.J., Asbridge J.R., Strong I.B. Solar wind ion composition. // Phys.Rev.Lett., 1968. N 20. P.393.
- [3] Hundhausen A.J., Gilbert H.E., Bame S.J. Ionization state of interplanetary Plasma, // J.Geophys.Res., 1968. V.73. P.5485.
- [4] Geiss J. Diagnostics of corona by in-situ composition measurements at 1 AU. Proc.ESA Workshop on Future Mission in Solar, Heliospheric and Space Plasma Physics, Garmisch-Partenkirchen, Germany, ESA-235, 1985.
- [5] Hundhausen A.J. Solar wind and coronal expansion, // N.Y.: Springer, 1972.
- [6] Neugebauer M. Measurements of the properties of solar wind plasma relevant to studies of its coronal sources, // Space Sci.Rev., 1982. V.33. P.127.
- [7] Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика, // М.:Мир. 1967.
- [8] Арцимович Л., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков, // М.:Атомиздат, 1979.
- [9] Rostoker G., Falthammar C.-G. Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in magnetic field at the Earth's surface, // J.Geophys.Res., 1967. V.72. P.5853.

- [10] Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K. On the cause of geomagnetic storms, // J.Geophys.Res., 1974. V.79. P.1105.
- [11] Perreault P., Akasofu S.-J. A study of geomagnetic storms, // Geophys.J.R.Astr.Soc., 1978. N 54. P.547.
- [12] Space Weather, Ed. by Paul Song, Howard J. Singer, and George L. Siscoe, // Geophysical Monograph Series, 2001. V.125.
- [13] Solar Cycle and Space Weather, ESA SP-477, 2002.
- [14] Труды конференции по физике солнечно-земных связей, Иркутск, 24-29 сентября 2001 г., ("Солнечно-земная физика". Вып. 2 (115), Иркутск. 2002).
- [15] Eyni M., Steinitz R. A model for the interaction of solar wind streams. // Proc.COSPAR Symposium E, ed. Shea M.A., Smart D.F., Wu S.T., Tel Aviv 1977. P.101.
- [16] Веселовский И.С. Об эволюции сильных неоднородностей в плазме солнечного ветра. // Геомагнетизм и аэрономия, 1978. Т.18. N1. С.3.
- [17] Hernandez R., Marsch E. Collisional time scales for temperature and velocity exchange between drifting Maxwellians, // J.Geophys.Res., 1985. V.90. N 11. P.11062.
- [18] Яковлев О.И., Ефимов А.И., Рубцов С.Н. Динамика и турбулентность солнечного ветра в области его формирования по данным радиопросвечивания с применением аппаратов "Венера-15" и "Венера-16". // Космич. исслед., 1987. N 25. С.251.
- [19] Marsch E., Muhlhauser K.-H., Rosenbauer H., Schwenn R., Neubauer F.M. Solar wind helium ions: observation of the

- Helios solar probes between 0.3 and 1 AU. // J.Geophys.Res. 1982. V.87. N 1. P.35.
- [20] Hirshberg J., Bame S.J., Robbins D.E. Solar flares and solar wind helium enrichments: July 1965-July 1967. // Solar Phys. 1972. V.23. N 2. P.467.
- [21] Ogilvie K.W. Helium abundance variations, // J.Geophys.Res. 1972. V.77. P.4227.
- [22] Moreno G., Palmiotto F. Variations of  $\alpha$ -particle abundance in the solar wind. // Solar Phys. 1973. V.30. P.207.
- [23] Neugebauer M. Observation of solar wind helium, // Fundamentals of Cosmic Physics. 1981. N 7. P.131.
- [24] Geiss J., Hirt P., Leutwyler H. On acceleration and motion of ions in corona and solar wind. // Solar Phys. 1970. N 12. P.458.
- [25] Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. // J.Geophys.Res. 1973. V.78. P.24.
- [26] Gosling J. T., McComas D. J., Phillips J. L. and Bame S. J. Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections. // J.Geophys.Res. 1991. V.96. P.7831.
- [27] Lindsay G.M., Russell C.T., Luhman J.G., Coronal mass ejection and stream interaction region characteristics and their potential geomagnetic effectiveness. // J.Geophys.Res. 1995. V.100. P.16999.
- [28] Петрукович А.А., Климов С.И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности. // Космич. исслед. 2000. Т.38. N 5. С.463.

055(02)2 Ротап rint ИКИ РАН  
Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

---

Подписано к печати 14.10.2002

---

Заказ      Формат 70×108/32      Тираж 100      1,5 уч.-изд.л.