

Российская Академия Наук  
Институт Космических Исследований

На правах рукописи

Ермолаев Юрий Иванович

Экспериментальное изучение крупномасштабной  
структуры солнечного ветра

(Специальность 01.03.03 – Физика Солнца)

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва  
2002 г.

# Оглавление

Введение .....	3
<b>1 Обзор предшествующих теоретических и экспериментальных результатов исследований и постановка задачи</b>	<b>20</b>
1.1 Солнечная атмосфера . . . . .	20
1.1.1 Крупномасштабная структура солнечной атмосферы . . . .	21
1.1.2 Химический и зарядовый состав ионной компоненты . . . .	22
1.2 Солнечный ветер . . . . .	26
1.2.1 Образование солнечного ветра . . . . .	26
1.2.2 Динамика химического и зарядового состава . . . . .	27
1.3 Измерения солнечного ветра . . . . .	29
1.3.1 Методы измерений . . . . .	30
1.3.2 Основные характеристики протонной компоненты . . . . .	32
1.3.3 Крупномасштабная структура солнечного ветра . . . . .	34
1.3.4 Элементный и зарядовый составы ионной компоненты . . . .	35
1.3.5 Оценки температуры солнечной короны по наблюдениям тяжелых ионов солнечного ветра . . . . .	40
1.3.6 Массовые скорости ионных компонент . . . . .	40
1.3.7 Кинетические температуры ионных компонент . . . . .	43
1.4 Солнечно-земные связи . . . . .	44
1.5 Постановка задачи исследований . . . . .	46
<b>2 Методика измерений и обработки данных</b>	<b>48</b>
2.1 Условия проведения экспериментов . . . . .	48
2.2 Описание аппаратуры . . . . .	49
2.2.1 Электростатические анализаторы ионов без селекции по массе . . . . .	50
2.2.2 Электростатические анализаторы с селекцией по массе ионов	53
2.2.3 Датчики интегрального потока . . . . .	55
2.2.4 Энерго-масс-анализатор ионов . . . . .	57
2.3 Методика обработки данных . . . . .	60
2.3.1 Методика определения гидродинамических параметров ионных компонент солнечного ветра . . . . .	60

2.3.2	Методика определения параметров тяжелых ионов солнечного ветра . . . . .	67
2.4	Заключение . . . . .	74
<b>3</b>	<b>Среднестатистические характеристики солнечного ветра</b>	<b>78</b>
3.1	Средние значения параметров солнечного ветра . . . . .	78
3.2	Вариации основных параметров солнечного ветра . . . . .	80
3.3	Зависимость температуры и концентрации протонов от скорости и потока импульса . . . . .	95
3.4	Зависимость содержания гелия от скорости и величины потока .	102
3.5	Зависимость разности скоростей и отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов от скорости . . . . .	107
3.6	О причинах нарушения термодинамического равновесия между протонами и $\alpha$ -частицами . . . . .	113
3.7	О роли столкновений в выравнивании скоростей и температур протонов и $\alpha$ -частиц . . . . .	119
3.8	Выводы . . . . .	129
<b>4</b>	<b>Крупномасштабная структура солнечного ветра</b>	<b>132</b>
4.1	Постановка задачи и описание методики . . . . .	132
4.2	Идентификация разных типов течений солнечного ветра . . . . .	135
4.2.1	Двумерные зависимости параметров от скорости и концентрации . . . . .	135
4.2.2	Обсуждение результатов . . . . .	139
4.2.3	Средние значения параметров в разных типах течений солнечного ветра . . . . .	145
4.3	Выводы . . . . .	149
<b>5</b>	<b>Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в поведении ионных компонент</b>	<b>151</b>
5.1	Потоки массы, импульса и энергии в разных типах течений солнечного ветра . . . . .	151
5.2	Поведение содержания и динамика $\alpha$ -частиц в разных типах течений солнечного ветра . . . . .	163
5.3	Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в поведении тяжелых ионов . . . . .	179
5.3.1	Динамика среднечасовых значений содержания и ионизационных температур тяжелых ионов . . . . .	180
5.3.2	Вариации содержания и ионизационных температур тяжелых ионов в потоках различного типа . . . . .	193
5.3.3	Наблюдения ионов $He^+$ в потоке, связанном с инжекцией корональной массы . . . . .	199
5.4	Выводы . . . . .	208

<b>6 Роль крупномасштабной структуры солнечного ветра в солнечно-земной физике</b>	<b>212</b>
6.1 Описание данных и общая характеристика периода . . . . .	212
6.2 Состояние магнитосферы . . . . .	214
6.3 Сопоставление бурь с солнечными источниками . . . . .	221
6.4 Сопоставление бурь с межпланетными источниками . . . . .	230
6.5 Реакция магнитосферы на магнитные облака и "слабый" солнечный ветер . . . . .	233
6.5.1 Магнитные облака и "слабый" солнечный ветер . . . . .	233
6.5.2 Геоэффективность рассматриваемых явлений . . . . .	235
6.5.3 Положение головной ударной волны и магнитопаузы . . . .	244
6.5.4 Некоторые особенности состояния магнитосферы . . . . .	250
6.6 Обсуждение результатов и выводы . . . . .	255
<b>Заключение</b>	<b>259</b>
<b>Литература</b> . . . . .	<b>270</b>
 <b>Список принятых сокращений</b> . . . . .	 <b>291</b>
<b>Список иллюстраций</b> . . . . .	<b>292</b>
<b>Список таблиц</b> . . . . .	<b>305</b>



# Введение

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. [19, Грингауз и др., 1960] и на американских космических аппаратах *Explorer 10* в 1961 г. [84, Bonetti et al., 1963] и *Mariner 2* в 1962 г. [179, Neugebauer and Snyder, 1962]), 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, [199, 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 [69, 147, Vame 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 [119, 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.). 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, и 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 [144, 176, 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. 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"[229, 2001], а также труды двух конференций, проходивших в сентябре 2001 г.: международной конференции "Solar Cycle and Space Weather", Vico Equense, Италия [228] и Всероссийской конференции по "Физике Солнечно-Земных Связей", Иркутск [56]).

**Целью работы** является экспериментальное изучение 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, и (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.

Полученные соотношения между гидродинамическими параметрами протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра 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-й Эдинбург, Великобритания, 1992, 18-й Вейсбаден, Германия, 1993, 19-й Гренобль, Франция, 1994, 20-й Гамбург, Германия, 1995, 21-й Гаага, Нидерланды, 1996, 22-й Вена, Австрия, 1997, 23-й Ницца, Франция, 1998, 24-й Гаага, Нидерланды, 1999, 25-й Ницца, Франция, 2000, 26-й Ницца, Франция, 2001, 27-й Ницца, Франция, 2002);

- на симпозиумах AGU (осенний Сан-Франциско, 1996, весенний Балтимор,

1997, осенний Сан-Франциско, 1998, весенний Бостон, 1999, осенний Сан-Франциско, 1999, весенний Вашингтон, 2000, осенний Сан-Франциско, 2000);

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

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

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

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

- на симпозиумах Геокосмос (2-й, Санкт-Петербург, Россия, 1998, 3-й, 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-й Львов, СССР, 1983, 5-й 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-й 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, 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).

**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 263 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.

Во **второй главе** приводится описание условий проведения экспериментов, характеристик научной аппаратуры и результатов ее лабораторных калиб-

ровок, а также методики обработки и анализа данных экспериментов.

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.

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 и отношение теплового давления к магнитному давлению (параметр  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ ). Этими типами течений являются (1) гелиосферный токовый слой, (2) потоки из областей с замкнутыми линиями коронального магнитного поля (из стримеров), (3) потоки из областей с открытым магнитным полем (из корональных дыр) (4) солнечный ветер, возмущенный нестационарными явлениями в солнечной короне, (5) потоки, содержащие выброшенное из солнечной короны вещество.

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.

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 потоков, которые имеют длительные интервалы, когда межпланетное магнитное поле содержит заметную компоненту, параллельную магнитному диполю Земли.

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 (1) за ударной волной, как изолированной, так и связанной с магнитным облаком или CIR, (2) в области сжатия непосредственно перед телом магнитным облаком и в CIR и (3) 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 79 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.*, т. 17, N5, с.780-792, 1979.
2. Zastenker G.N., Yermolaev Yu.I. Observations of the solar wind stream with high heavy ion abundance and coronal conditions, - Препринт Пр-579, М.: ИКИ АН СССР, 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.*, т. 18, N5, с.761-765, 1980.
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, N2, с.64-69, 1981.
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*, v.29, N 11, p.1235-1240, 1981.

6. Zastenker G.N., Vaisberg O.L., Balebanov V.M., Omeltschenko A.N., Nozdachev 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.-Preprint D-305, М.: ИКИ АН СССР, 1982.
7. Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Пинтер С. и др. Наблюдение солнечного ветра с высоким временным разрешением, - *Космич. Исслед.*, т.20, №6, с.900-905, 1982.
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 Пр-841, М.: ИКИ АН СССР, 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", Horska Kvilda, Publ. MFF UK, Czechoslovakia, p.1-32, 1984.
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, с.10-32, 1984.
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, с.73-80, 1984.
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.*, т.22, №5, с.774-780, 1984.
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 Пр-951, М.: ИКИ АН СССР, 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 Пр-969, М.: ИКИ АН СССР, 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*, v. B 35, p.557- 567, 1985.
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, p.39-59, 1985.
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, p.113-142, 1985.
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, p.330-341, 1985.
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.*, т.24, N2, с.151-165, 1986.
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.*, т.24, N2, с.192-199, 1986.
21. Ермолаев Ю.И. Поведение кинетических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц в зависимости от скорости солнечного ветра, - *Космич. Исслед.*, т.24, N5, с.725-734, 1986.
22. Avanov 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*, v. B 37, p.759-774, 1987.
23. Ермолаев Ю.И. Крупномасштабные характеристики ионной компоненты солнечного ветра по результатам наблюдений на космических аппаратах,- Препринт Пр-1281, М.: ИКИ АН СССР, 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 Пр-1357, М.: ИКИ АН СССР, 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 Пр-1332, Л.: ФТИ им.А.Ф.Иоффе АН СССР, 1988.
26. Ермолаев Ю.И. Экспериментальное изучение малых составляющих ионной компоненты солнечного ветра,- дисс. на соискание степени к.ф.-м.н., ИКИ АН СССР, 1988.
27. 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*, v.B 39, p.408-414, 1989.
28. 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.*, v.9, N 4, p.117-121, 1989.
29. 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.*, v.9, N 4, p.123-126, 1989.
30. Ермолаев Ю.И., Журавлев В.И., Застенкер Г.Н. и др. Наблюдения однократно ионизованного гелия в солнечном ветре, - *Космич. Исслед.*, т.27, N5, с.717-725, 1989.
31. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. Динамика потоков тяжелых ионов солнечного ветра и некоторых характеристик солнечной короны, - *Космич. Исслед.*, т.28, N1, с.103-116, 1990.
32. 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.*, т.28, N2, с.218-225, 1990.
33. 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 Пр-1575, М.: ИКИ АН СССР, 1990.

34. Ермолаев Ю.И., Ступин В.В. Связь относительного содержания гелия с условиями в солнечном ветре по измерениям на спутнике "Прогноз-7", - *Космич. Исслед.*, т.28, N4, с.571-580, 1990.
35. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V. Some alpha-particle heating and acceleration mechanisms in the solar wind: Prognoz 7 measurements. - *Planet.Space Sci.*, v.38, N10, p.1305-1313, 1990.
36. Ермолаев Ю.И. Новый подход к изучению крупномасштабной структуры солнечной короны по результатам измерения параметров солнечного ветра, - *Космич. Исслед.*, т.28, N6, с.890-902, 1990.
37. 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, v.1, p.391-392, 1990.
38. 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.*, v.11, N1, p.79-82, 1991.
39. Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind and solar corona: Prognoz 7 observations.- *Adv.Space Res.*, v.11, N1, p.75-78, 1991.
40. Zastenker G.N., Avanov L.A., Yermolaev Yu.I. et al. Variability of the coronal structures and ion components in the solar wind. - *Czechoslovak Journal of Physics*, v.B 41, N10, p.1001-1008, 1991.
41. Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind and its relationship with solar corona: Prognoz 7 observations. - *Planet. Space Sci.*, v.39, N10, p.1351-1361, 1991.
42. Yermolaev Yu.I. Helium abundance, acceleration and heating and large-scale structure of the solar wind. - In: Solar Wind Seven, COSPAR Colloquium, v.3, p.411-418, 1992.
43. 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, v.1, p.318-327, 1992.
44. 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, v.2, p.288-293, 1992.
45. 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, p.217-222, 1992.

46. 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.*, т.30, N6, с.833-851, 1992.
47. 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, p.339-342, 1992.
48. Ермолаев Ю.И. Наблюдения ионов  $^4\text{He}^{++}$  в солнечном ветре, - *Космич. Исслед.*, т.32, N1, с.93-125, 1994.
49. Yermolaev Yu.I. Signature of coronal holes and streamers in the interplanetary space.-*Space Sci.Reviews*, v.70, p.379-386, 1994.
50. Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N. Differential flow between protons and alphas in the solar wind: Prognoz 7 observations. -*J. Geophys. Res.*, v.99, N A12, p.23503-23504, 1994.
51. Yermolaev Yu.I. Scientific program of solar and solar wind observations: INTERBALL and Relict-2 missions. -Proc. 3rd SOHO Workshop, ESA SP-373, p.441-444, 1994.
52. Yermolaev Yu.I. Scientific program of observations on Solar-Terrestrial Physics on the Relict-2 mission. -INTERBALL mission and Payload, CNES-IKI-RSA, p.409-410, 1995.
53. Ермолаев Ю.И. Скорости и температуры протонов и альфа-частиц в разных типах течений солнечного ветра, - *Космич. Исслед.*, т.33, N4, с.381-388, 1995.
54. 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, v.95, p.288-299, 1996.
55. Yermolaev Yu.I. Solar wind helium observations on the Prognoz 7 satellite. - Proc.Solar Wind 8 Conference, AIP Conference Proceedings 382, New York, p.269-272, 1996.
56. 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, p.475-478, 1996.
57. Yermolaev Yu.I., Stupin V.V. Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognoz 7 observations. - *J. Geophys. Res.*, 102, v. A2, p.2125-2136, 1997.

58. Yermolaev Yu.I. INTERBALL observations of the plasma sheet. - *Adv.Space Res.*, p.983-991, 1997.
59. 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, p.155-161, 1997.
60. 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, p.401-404, 1997.
61. Savin S.P., Balan O., Borodkova N.L., Budnik E., ... Yermolaev Yu. et al. INTERBALL magnetotail boundary case study, - *Adv.Space Res.*, p.999- 1015, 1997.
62. 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.*, 15, v.5, p.533-541, 1997.
63. 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.*, т. 36, N 3, с.251-260, 1998.
64. 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.*, v.25, N14, p.2565-2568, 1998.
65. Ермолаев Ю.И. Наблюдения плазменного слоя в проекте ИНТЕРБОЛ. - *Космич.Исслед.*, N 3, с.273-281, 1998.
66. 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.*, N 6, 1998.
67. 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., p.25-44, 1998b.

68. 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.*, v.25, N15, p.2963-2966, 1998.
69. 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.*, т.37, N2, с. 143-150, 1999.
70. 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.*, v.26, p.177-180, 1999.
71. 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*, v.25, N1-2, p.177-180, 2000.
72. 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.*, v.25, N 7/8, p.1697-1701, 2000.
73. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Николаева Н.С. Реакция магнитосферы Земли на события в солнечном ветре по данным проекта ИНТЕРБОЛ, - *Космич. Исслед.*, т.38, N 6, с.563-576, 2000.
74. 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.*, v.105, N.A11, p.25143-25154, 2000.
75. 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.*, v. 105 , N A11, p. 25155- 25170, 2000.
76. 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.*, v.25, N7-8, p.1405-1409, 2000.

77. Ермолаев Ю.И. Крупные геомагнитные возмущения и их корреляция с межпланетными явлениями в период работы спутников ИНТЕРБОЛ-1, 2. - *Космич. Исслед.*, т.39, N5, с.324-331, 2001.
78. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976-2000 гг. - *Космич. Исслед.*, т.40, N1, 2002.
79. Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Statistical relations between solar, interplanetary and geomagnetic disturbances during 2.3 solar cycles (1976-2000), -ESA SP-477, p.579-582, 2002.

Кроме того, некоторые технические детали использованной научной аппаратуры описаны в следующих авторских свидетельствах СССР и ЧССР:

1. Застенкер Г.Н., Лейбов А.В., Ермолаев Ю.И. и др. Устройство калибровки датчика интегрального потока, авт. свид. N 1032899, 1982.
2. Застенкер Г.Н., Лейбов А.В., Ермолаев Ю.И. и др. Устройство калибровки электростатического анализатора, авт. свид. N 1032934, 1982.
3. Вайсберг О.Л., Евдокимов В.П., Ермолаев Ю.И. и др., Способ обнаружения сильных разрывов в космической плазме, авт. свид. N 1064857, 1982.
4. Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И. Устройство относительной калибровки сферического электростатического анализатора, авт. свид. N 1086992, 1983.
5. Вайсберг О.Л., Ермолаев Ю.И., Романов С.А., Хименес Р.А. Устройство относительной калибровки полусферического электростатического анализатора, авт. свид. N 1145780, 1983.
6. Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З., Ермолаев Ю.И., Брунхофер В. Устройство для счета импульсов, авт. свид. N 1144598, 1984. (авт.свид. ЧССР 242353)
7. Застенкер Г.Н., Немечек З., Шафранкова Я., Ермолаев Ю.И., Симерски М. Устройство для счета импульсов, авт. свид. N 1195818, 1985. (авт. свид. ЧССР 240375)
8. Zastenker G. N., Nemecek Z., Safrankova J., Jermolajev J.I., Simerski M., Zarizeni pro citani impulsu s odmocninovou charakteristikou, Авт.свид. ЧССР 240377, 1984.
9. Zastenker G. N., Nemecek Z., Safrankova J., Jermolajev J.I., Simerski M., Zarizeni pro citani impulsu s odmocninovou charakteristikou s vratnym citacem, авт. свид. ЧССР 240378, 1984.

10. Zastenker G. N., Nemecek Z., Safrankova J., Jermolajev J.I., Zarizeni pro mereni teploty a rychlosti kosmickeho plasmatu, авт.свид. ЧССР 242803, 1985.
11. Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Стефанович А.Е., Немечек З., Шафранкова Я. Измеритель вектора интегрального потока космической плазмы, авт. свид. 1324563, 1987. (авт.свид. ЧССР 242804)

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное участие в разработке идеологии, изготовлении, калибровке на вакуумном стенде и испытаниях научных приборов 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 интерпретация результатов.



# Глава 1

## Обзор предшествующих теоретических и экспериментальных результатов исследований и постановка задачи

Для корректной постановки научных задач и правильной интерпретации результатов измерений необходимо было проанализировать результаты исследований, выполненных до начала серии экспериментов на спутниках *Прогноз 7* (ноябрь 1978 г.), *Прогноз 8*, *Прогноз 10* (проект "Интершок") и *Прогноз 11,12* (проект "Интербол"). В этой главе, после краткого описания общих представлений о строении Солнца и свойствах солнечной атмосферы, мы опишем три стадии, которые проходит плазма солнечной атмосферы до момента ее регистрации на космических аппаратах: (1) формирование плазмы (в том числе массового и зарядового состава ионной компоненты) солнечной атмосферы; (2) выход плазмы (включая различные ионные составляющие) в межпланетное пространство и (3) изменение характеристик плазмы при ее движении в межпланетном пространстве. Хотя реально такого резкого деления на стадии в природе не существует, и эти процессы частично перекрываются во времени и пространстве, мы будем в своем рассмотрении придерживаться этого порядка, отмечая, где это необходимо, моменты, когда эти процессы могут идти одновременно. В этой главе также кратко обсуждается комплекс проблем солнечно-земных связей.

### 1.1 Солнечная атмосфера

Наши представления о внутреннем строении Солнца основываются на теоретических моделях (см. например [122, 60, Gibson, 1973; Шкловский, 1977]) и некоторых косвенных следствиях из этих моделей. В центральной части Солнца

Таблица 1.1: Характеристики атмосферы Солнца и солнечного ветра

Области	Параметры		
	Высота над поверхностью, км	Концентрация электронов, $\text{см}^{-3}$	Температура электронов, $^{\circ}\text{K}$
Фотосфера	$0 - 5 \cdot 10^2$	$10^{14} - 10^{11}$	$6,5 \cdot 10^3 - 4,1 \cdot 10^3$
Хромосфера	$5 \cdot 10^2 - 10^4$	$10^{11} - 10^9$	$4,1 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^6$
Основание короны	$\sim 10^4$	$\sim 10^9$	$\sim 2 \cdot 10^6$
Солнечный ветер на 1 а.е.	$1,5 \cdot 10^8$	$\sim 5$	$\sim 10^5$

расположено плотное ( $\rho \sim 160 \text{ г см}^{-3}$ ) и горячее ( $T \sim 1,6 \cdot 10^7 \text{ K}$ ) ядро. В этой области в результате ядерных реакций синтеза происходит выделение энергии и образование ядер более тяжелых, чем протоны. Вследствие процессов переноса продукты реакций и энергия распространяются через конвективную зону и достигают солнечной атмосферы, которая может изучаться астрономическими методами и исследована более полно, чем внутренние части Солнца.

### 1.1.1 Крупномасштабная структура солнечной атмосферы

В большинстве моделей солнечная атмосфера рассматривается в приближении "спокойного Солнца" [122, Gibson, 1973], когда предполагается, что Солнце представляет собой статический сферически симметричный шар, в котором свойства вещества зависят только от радиуса и одинаковы в пределах любого шарового слоя. Таким образом в модели спокойного Солнца пренебрегают наличием неоднородностей. Однако уточняемая модель спокойного Солнца может служить тем фоном, на котором изучаются образование крупномасштабных структур и развитие некоторых динамических процессов.

Атмосфера Солнца очень неоднородна по высоте [262, 183, 122, Zirin, 1966; Newkirk, 1967; Gibson, 1973]: если концентрация монотонно спадает с увеличением высоты над поверхностью Солнца, то температура электронов, которая на поверхности составляет  $\sim 6,5 \cdot 10^3 \text{ K}$ , сначала уменьшается, достигая величины  $\sim 4 \cdot 10^3 \text{ K}$ , затем резко возрастает до  $\sim 2 \cdot 10^6 \text{ K}$  и снова медленно спадает. Часть атмосферы, находящаяся от поверхности Солнца до минимума температуры, получила название фотосферы; на нее приходится основная часть излучения Солнца с максимумом в видимом диапазоне длин волн. От минимума температуры до ее максимума лежит хромосфера, а начиная с максимума температуры и выше находится солнечная корона, которая, расширяясь в

межпланетное пространство, образует солнечный ветер. В Табл. 1.1 приводятся некоторые параметры солнечной атмосферы, полученные в приближении спокойного Солнца.

Наблюдения, проведенные астрономическими методами, показали, что все слои солнечной атмосферы имеют сложную внутреннюю структуру, причем некоторые образования оказываются взаимосвязанными и прослеживаются на протяжении нескольких слоев солнечной атмосферы (см. Табл. 1.2).

Анализ крупномасштабной структуры солнечной короны показывает, что в стационарном случае только корональные стримеры и дыры могут являться долгоживущими (до нескольких оборотов Солнца) источниками потоков солнечного ветра с квазистационарными параметрами плазмы и магнитного поля внутри этих потоков. Основной причиной различий в параметрах корональных дыр и стримеров является высокая и низкая расходимость силовых линий глобального магнитного поля, которое оказывает существенное влияние на передачу массы, импульса и энергии в солнечной атмосфере и, следовательно, на механизмы ускорения плазмы солнечного ветра.

Наиболее ярким проявлением солнечной активности является солнечная вспышка, в результате которой происходит быстрое (за несколько десятков минут) выделение большого количества энергии. Это приводит к локальному ускорению сравнительно небольшого объема плазмы, который в солнечном ветре, с одной стороны, может иметь характеристики, отличающиеся от квазистационарных течений, и, с другой стороны, может порождать МГД разрывы и, в частности, межпланетные ударные волны, распространяющиеся по плазме солнечного ветра. Кроме того, в солнечной атмосфере наблюдаются так называемые "транзиенты (transients)" и "выбросы корональной массы (coronal mass ejections - CME)", которые также проявляются в движении плазменных образований в солнечной атмосфере и межпланетной среде, но не всегда сопровождаются вспышками. Природа этих динамических явлений до сих пор до конца не понята.

Далее в этой главе (см. раздел 1.3.3.) будут показаны результаты по изучению различий типов течений солнечного ветра, полученные до начала проведения серии экспериментов на спутниках *Прогноз 7, 8, 10, 11 и 12*.

### **1.1.2 Химический и зарядовый состав ионной компоненты**

Химический состав солнечной атмосферы определяется типом и скоростью ядерных реакций в недрах Солнца и механизмами переноса продуктов реакций в конвективной зоне. На основе оценок возраста и массы звезды можно предсказать количество различных элементов, образовавшихся в ядре. Однако физические механизмы переноса в конвективной зоне недостаточно хорошо изучены, и оценки содержания различных элементов во внешней части конвективной зоны и атмосфере Солнца на основе теоретических моделей содержат большую неопределенность. Поэтому большое значение приобретают

Таблица 1.2: Структуры атмосферы Солнца и их характеристики

Структуры	Параметры			
	Характерный размер <sup>*)</sup> , км	Характерное время жизни	Плотность плазмы	Температура плазмы
Фотосфера				
Гранулы	$7 \cdot 10^2$	8 мин.		
Пятна	$4 \cdot 10^4$	неск.мес.	низкая	низкая
Факелы	$5 \cdot 10^3$	1-2 мес.	высокая	высокая
Цепочка факелов	$5 \cdot 10^4$	1 год	высокая	высокая
Хромосфера				
Спикулы	$0.7 \times (1 - 10) \cdot 10^3$	5-10 мин.	высокая	средняя
Сетка	$(2 - 3) \cdot 10^4$	1 сутки		
Фибриллы (волоконца)	$(1 \times 10) \cdot 10^3$	0,3-1 час	средняя	средняя
Флоккулы	$1 \cdot 10^5$	неск.мес.	высокая	высокая
Корона				
Петли (арки) АО	$(1 \times 10) \cdot 10^4$	неск.мес.	высокая	высокая
Длинные петли	$(1 \times 10) \cdot 10^4$	неск.мес.	высокая	средняя
Стримеры	$(1 - 10) \cdot 10^5$	неск.мес.	высокая	средняя
Узкие лучи	$(1 \times 10) \cdot 10^4$	неск.мес.	высокая	средняя
Дыры	$(1 - 10) \cdot 10^5$	неск.мес.	низкая	низкая
Конденсации	$1 \cdot 10^5$	неск.мес.	высокая	высокая
Протуберанцы	$1 \cdot 10^5$	1 год	высокая	низкая
Вспышки	$(1 - 10) \cdot 10^5$	(0,1-10) час	высокая	высокая
Выбросы массы	$(1 - 10) \cdot 10^6$	1 сутки	средняя	средняя

\*) Если структура имеет два характерных размера, они приводятся через знак  $\times$

Таблица 1.3: Химический состав Солнца и солнечного ветра

Области пространства	Относительное содержание			
	$He/H, 10^{-2}$	$O/H, 10^{-4}$	$Si/H, 10^{-5}$	$Fe/H, 10^{-5}$
Внешняя конвективная зона	$8 \pm 1$	$6,9 \pm 2,0$	$3,9 \pm 1,7$	$3,4 \pm 1,7$
Фотосфера	6,0	5,9	2,7	2,9
Корона	16,0	4,5	9,1	9,1
Солнечный ветер	Разные КА, данные до 1978 г.			
	1,3 – 5,3	1,9 – 8,4	2,8 – 11,7	1,4 – 13,9
	Разные КА, данные до 1988 г.			
	$4 \pm 1$	$5 \pm 2$	$7,6 \pm 3,0$	$5 \pm 3$
	<i>Прогноз 7</i> , средние за $\sim 1$ сут.			
	0,6 – 6,9	1,6 – 17,6	1,6 – 24,6	1,8 – 14,2
	<i>Прогноз 7</i> , средние за $\sim 6$ мес.			
	$5,4 \pm 3,9$	$6,8 \pm 5,6$	$8,6 \pm 8,2$	$5,5 \pm 4,9$

результаты астрономических наблюдений солнечной атмосферы. Таблица 1.3 суммирует данные по химическому составу, полученные в ряде работ для фотосферы [113, 238, Formisano and Moreno, 1971, Unsold, 1969], короны [113, Formisano and Moreno, 1971] и солнечного ветра (последние данные будут подробно обсуждены в разделе 1.3.4 настоящей главы, а также в главе 5). Прямые наблюдения гелия в солнечной атмосфере затруднены, и приведенные оценки его содержания получены по косвенным данным [144, Hundhausen, 1972].

Химический состав различных частей солнечной атмосферы меняется сравнительно мало. Некоторое увеличение относительного содержания тяжелых элементов в солнечной короне согласуется с выводами ряда моделей, согласно которым более легкие протоны быстрее диффундируют из горячей области, чем более тяжелые ионы; в результате этого происходит накопление тяжелых элементов в солнечной короне [144, Hundhausen, 1972].

Зарядовый состав ионной компоненты солнечной атмосферы определяется конкретными механизмами ионизации и рекомбинации ионов, которые сильно зависят от условий в окружающей плазме и прежде всего от температуры и концентрации. Можно предположить, что кинетические температуры всех ионов и электронов солнечной короны равны. В этом случае основными механизмами, ответственными за ионизационное состояние ионов в короне, являются столкновительная ионизация и диэлектронная и излучательная рекомбинации. Состояние иона определенного химического элемента в  $i$ -том ионизационном состоянии (с зарядом  $+i$ )  $n_i$  определяется формулой ионизационного баланса [147, Hundhausen et al., 1968]:

$$\text{div}(n_i \vec{U}) = n_e[n_{i-1}C_{i-1} - n_i(C_i + R_i) + n_{i+1}R_{i+1}], \quad (1.1)$$

где  $\vec{U}$  - вектор массовой скорости,  $n_e$  и  $n_i$ ,  $n_{i-1}$ ,  $n_{i+1}$  - плотности электронов и ионов (в разных ионизационных состояниях) соответственно,  $C_i$  - коэффициент ионизации для перехода из состояния  $i$  в состояние  $i + 1$ ,  $R_i$  - коэффициент рекомбинации для перехода из состояния  $i$  в состояние  $i - 1$ . Коэффициенты ионизации и рекомбинации являются функциями температуры, а плотность электронов, вектор массовой скорости и температура - функциями координат (в приближении сферически симметричной короны - функциями гелиоцентрического расстояния).

В нижней части солнечной короны, где скорость перемещения объема плазмы не существенна по сравнению со скоростями атомных процессов (т.е. характерное время расширения плазмы  $\tau_e$  заметно превосходит характерные времена ионизации  $\tau_i$  и рекомбинации  $\tau_r$ ) [147, Hundhausen et al., 1968], на фиксированной высоте успевает установиться ионизационное равновесие в соответствии с условиями окружающей плазмы. В этом случае можно пренебречь левым членом уравнения (1.1) и решать уравнение ионизационного равновесия:

$$0 = n_{i-1}C_{i-1} - n_i(C_i + R_i) + n_{i+1}R_{i+1}. \quad (1.2)$$

Последнее уравнение не зависит от высотного профиля концентрации электронов и вектора массовой скорости, что сильно упрощает задачу, так как эти параметры в большинстве случаев недостаточно хорошо определяются из наблюдений.

В этом приближении, когда в области образования ионизационных состояний ионов пренебрегается переносным движением плазмы, были проведены расчеты относительного содержания ионов разных степеней ионизации ряда химических элементов как функции температуры электронов [150, 63, Jordan, 1969, Allen and Dupree, 1969]. В этом случае зарядовый состав ионной компоненты плазмы является функцией только температуры и может быть использован для ее оценки.

## 1.2 Солнечный ветер

### 1.2.1 Образование солнечного ветра

В 1957 г. Е. Паркер (см. например [199, Parker, 1961]), анализируя условия гидродинамического равновесия солнечной короны, показал, что из-за высокой температуры солнечная корона не может находиться в гидростатическом равновесии, а должна расширяться и при имеющихся граничных условиях вытекающая плазма, названная автором солнечным ветром, должна достигать в межпланетной среде сверхзвуковой скорости.

Одномерное и одножидкостное уравнение движения солнечного ветра в МГД приближении можно получить из системы уравнений сохранения:

$$\frac{1}{u} \frac{du}{dr} (u^2 - \frac{2kT}{m}) = \frac{4kT}{mr} - \frac{GM_o}{r^2}, \quad (1.3)$$

где  $r$  - гелиоцентрическое расстояние,  $T$  - температура,  $G$  - гравитационная постоянная,  $M_o$  - масса Солнца. В этом уравнении скорость расширения  $u$  может иметь 4 типа решений, однако, задав очевидные граничные условия - скорость на поверхности Солнца и поток вещества на бесконечности малы, - получим решение, согласно которому вещество достигает вблизи Солнца звуковой скорости и далее, продолжая ускоряться, движется в межпланетной среде со сверхзвуковой скоростью. Параметры, предсказанные моделью Паркера, наблюдаются в лишь в крайне медленных и плотных потоках солнечного ветра и заметно отличаются от обычных условий в солнечном ветре.

В последующих моделях [133, 144, Hartle and Sturrock, 1968; Hundhausen, 1972] было показано, что эта трудность может быть преодолена, если предположить, что в солнечной короне и в солнечном ветре существует дополнительный источник энергии. Физическая природа механизмов, обеспечивающих приток дополнительной энергии, была предметом ряда работ и подробно обсуждалась в обзоре [140, Hollweg, 1978]. Отмечалось, что проблема дополнительного источника энергии для ускорения солнечного ветра напрямую

связана с другой нерешенной проблемой - поиском механизмов, приводящих к нагреву солнечной короны до столь высокой температуры ( $\sim 2 \cdot 10^6 K$ ). Поэтому наличие структуры и крупномасштабных динамических процессов в солнечной атмосфере должны проявляться в свойствах солнечного ветра [144, Hundhausen, 1972].

Плазма солнечного ветра является горячей бесстолкновительной плазмой с замороженным магнитным полем и с источником энергии в солнечной короне. В такой плазме могут распространяться разного рода разрывы и возмущения и развиваться различные неустойчивости [2, 3, Альвен и Фельтхаммар, 1967; Арцимович и Сагдеев, 1979]. И хотя эти локальные плазменные процессы достаточно короткоживущие по сравнению с характерным временем распространения солнечного ветра от Солнца до Земли, а также по сравнению со временем, в течение которого космический аппарат находится в течении, связанном с какой-нибудь крупномасштабной солнечной структурой, задача идентификации различных структур и явлений солнечного ветра, а тем более их сопоставление со структурами и явлениями солнечной короны, оказывается достаточно сложной. Тем не менее при достаточно полной диагностике солнечного ветра и межпланетного магнитного поля эта задача может быть решена с достаточной степенью точности (см., например, работы [176, 119, 97, 42, 4, Neugebauer, 1982; Geiss, 1985; Eiselevich, 1992; Иванов, 1996; Бадалян и др., 1999] и ссылки в них).

### 1.2.2 Динамика химического и зарядового состава

В большинстве моделей образования солнечного ветра (например, модель Паркера) не рассматривается проблема выхода малых ионных компонент из солнечной атмосферы в межпланетное пространство. В этих моделях солнечный ветер представляется в одно- или двухжидкостном приближении. Лишь в некоторых моделях исследуется в качестве пробных частиц поведение малых ионов на фоне движения основной, протонной, компоненты солнечного ветра.

Группа исследователей [148, 149, 95, 170, 242, 64, Jokipii, 1965, 1966; Delache, 1967; Nakada, 1969; Yeh, 1970; Alloucherie, 1970] изучала проблему движения тяжелых ионов в солнечной атмосфере и их выхода в межпланетное пространство с учетом тепловой диффузии. В результате этих работ пришли к выводу, что с ростом расстояния от максимума температуры солнечной атмосферы содержание тяжелых ионов относительно протонов должно заметно уменьшаться.

Позже в моделях [171, 121, 151, Nakada, 1970; Geiss et al., 1970; Joselyn and Holzer, 1978] исследовалось влияние кулоновского трения основной, протонной, и других ионных компонент плазмы на вытягивание малых составляющих в солнечный ветер. В частности, в работе [121, Geiss et al., 1970] получено указание на то, что существует такой минимальный



порог величины потока протонов, выше которого скорость тяжелых ионов равна скорости протонов, и накопление малых составляющих в короне не происходит. В работе [151, Joselyn and Holzer, 1978] также показано, что при определенных условиях в области ускорения плазмы солнечного ветра кулоновского трения достаточно, чтобы относительное содержание  $\alpha$ -частиц не менялось с увеличением гелиоцентрического расстояния.

Одним из выводов моделей, рассматривающих преимущественное ускорение тяжелых ионов за счет их взаимодействия с волнами в солнечном ветре [139, 93, 66, 141, 166, Hollweg, 1974; Chang and Hollweg, 1976, Auer and Rosenbauer, 1977; Hollweg and Turner, 1978; McKenke et al., 1978], является заключение о выходе малых составляющих в солнечный ветер без их накопления в солнечной короне. Хотя указанные модели испытывают серьезные трудности при объяснении всей совокупности наблюдаемых фактов, они правильно описывают соотношение некоторых других параметров ионов, в частности, их переносных скоростей и кинетических температур (см. разделы 1.3.6 и 1.3.7).

После выхода ионной компоненты солнечного ветра в межпланетное пространство ее химический состав при дальнейшем движении практически не изменяется. Таким образом содержание химических элементов в солнечном ветре определяется конкретными механизмами, которые действуют в области выхода ионов в межпланетное пространство. Как было показано выше, исследование этих механизмов в различных теоретических моделях не дает однозначного вывода об эффективности выхода различных ионов в межпланетное пространство, и поэтому большое значение имеет экспериментальная проверка теоретических представлений с помощью космических аппаратов.

Во многих работах рассматривалась проблема зарядового состава ионной компоненты солнечного ветра и его изменения при движении плазмы из солнечной атмосферы в межпланетное пространство. В пионерской работе [147, Hundhausen et al., 1968] было проанализировано изменение с гелиоцентрическим расстоянием характерных времен расширения плазмы и процессов ионизации и рекомбинации и показано, что переход от условия ионизационного равновесия ( $\tau_e \gg \tau_r, \tau_i$ ) к условию бесстолкновительной плазмы ( $\tau_e < \tau_r, \tau_i$ ) происходит в достаточно узкой полосе высот от поверхности Солнца. Поэтому установившееся соотношение между различными ионизационными состояниями в результате ионизационного равновесия в короне для каждого химического элемента не успевает измениться при выходе ионов в межпланетное пространство и должно сохраниться в солнечном ветре. Возможность изменения ионизационных состояний ионов солнечного ветра за счет взаимодействия с солнечным ультрафиолетовым излучением, а также с межзвездными нейтральными атомами водорода и гелия исследовалась в работах [69, 147, 79, 143, Bame et al., 1968; Hundhausen et al., 1968; Blum and Fahr, 1970; Holzer and Axford, 1971]. В результате было показано, что влияние этих процессов на зарядовый состав солнечного ветра пренебрежимо мало.

Движение плазмы в области "замораживания" ионизационных состояний

может оказать более заметное влияние на зарядовый состав ионов в межпланетном пространстве и тем самым внести погрешность в оценки температуры короны по наблюдениям ионной компоненты солнечного ветра [72, 73, Vame et al., 1974, 1975].

В указанных моделях были сделаны некоторые допущения, касающиеся характеристик области формирования солнечного ветра: (1) истечение плазмы стационарно, (2) истечение плазмы сферически симметрично, (3) все ионы имеют массовую скорость равную протонной, (4) электроны обладают максвелловской функцией распределения, (5) высотный профиль электронной температуры является монотонно убывающим. Однако все эти предположения могут нарушаться [121, 151, 141, 211, 169, Geiss et al., 1970; Joselyn and Holzer, 1978; Hollweg and Turner, 1978; Ryan and Axford, 1975; Munro and Jackson, 1977], поэтому важно проанализировать возможные отклонения от предсказаний моделей ионизационного равновесия при нарушении этих предположений. По-видимому, оценки электронной температуры в области "замораживания" по измерениям ионизационных состояний в солнечном ветре совпадают (в пределах измерительной неопределенности  $\sim 30\%$ ) с реальной температурой электронов на высоте "замораживания", однако высота "замораживания" зависит от условий в солнечной короне, поэтому оценки температуры трудно однозначно привязать к определенной высоте солнечной атмосферы. Особенно большая погрешность в оценке ионизационной температуры возникает при изучении потоков солнечного ветра, образовавшихся в результате активных процессов на Солнце (вспышки, выбросы корональной массы и т.д.), когда плазма в области "замораживания" ионизационных состояний может достигать больших переносных скоростей. Поэтому в применении к таким потокам результаты работ [150, 63, Jordan, 1969; Allen and Dupree, 1969], полученные в предположении ионизационного равновесия, могут давать большую погрешность при их использовании в оценке температуры короны по результатам измерения ионизационного состава ионной компоненты солнечного ветра.

Таким образом, теоретические представления о формировании плазмы солнечной короны, включая ее зарядовый и элементный составы, ее нагреве и ускорении при образовании солнечного ветра требуют экспериментальной проверки с помощью космических аппаратов.

### 1.3 Измерения солнечного ветра

К началу проведения серии наших экспериментов на спутниках, начиная с ИСЗ *Прогноз 7* в 1978 г., прошло уже более 15 лет с тех пор, как советские и американские космические аппараты провели первые прямые наблюдения солнечного ветра [19, 130, 179, 84, Грингауз и др., 1960; Gringauz, 1963; Neugebauer and Snyder, 1962; Bonetti et al., 1963]. Полученный за этот период

экспериментальный материал лег в основу наших представлений о процессах формирования солнечного ветра и его динамики в межпланетном пространстве, а также позволил сформулировать основные нерешенные задачи, которые предстояло рассмотреть в ходе этих экспериментов.

Прежде чем перейти к изложению основных результатов предшествующих экспериментов, коротко остановимся на использовавшихся методах изучения солнечного ветра.

### 1.3.1 Методы измерений

С самого начала прямых исследований солнечного ветра на космических аппаратах использовались разные методы измерений, отличающиеся как набором измеряемых параметров, так и лежащими в их основе физическими принципами.

Один из наиболее простых методов исследования химического состава солнечного ветра заключается в экспонировании металлических фольг [121, 83, Geiss et al., 1970; Boltenkov et al., 1972] и слюдяных пластин [261, Zinner et al., 1974] с последующим их анализом в земных лабораториях. Кроме очевидного неудобства, связанного с необходимостью возвращения образцов на Землю, этот метод обладает и другим недостатком, а именно: возможностью измерять лишь суммарный поток ионов за некоторый достаточно продолжительный интервал времени. Тем не менее, этот метод позволил получить важную информацию о содержании некоторых редких ионов в солнечном ветре.

Информация о величине и направлении потоков электронов и ионов, а также об их интегральных спектрах (т.е. величине потока электронов или ионов выше некоторого запирающего потенциала, изменяющегося во времени), была получена с помощью цилиндров Фарадея [19, 130, 16, Грингауз и др., 1960; Gringauz, 1963; Гальперин и др., 1972]. Так как в основу этого метода положено измерение тока заряженных частиц, протекающих через коллектор прибора, то он позволяет оценить число (т.е. величину потока) зарегистрированных прибором элементарных зарядов, двигающихся в определенном направлении и с определенной энергией. При измерении потока ионов необходимо учитывать, что различные ионы несут различные заряды, но так как число атомов отличных от протонов невелико (см. Табл. 1.3 в разделе 1.1.2), то оценка концентрации в предположении однозарядности ионов солнечного ветра находится в пределах методических погрешностей измерений.

Наиболее информативными оказались измерения ионной и электронной компонент солнечного ветра, выполненные методом энергоанализа при помощи электростатических анализаторов разной конструкции [16, 176, 119, Гальперин и др., 1972; Neugebauer, 1982; Geiss, 1985]. Электростатические анализаторы измеряют потоки заряженных частиц в узких угловом конусе и энергетическом диапазоне в шкале энергии, деленной на заряд частицы ( $E/q$ ). При достаточно полном сканировании по энергиям и углам можно получить

оценки функции распределения частиц по скоростям и их гидродинамических параметров. Если при измерениях электронов этот метод реализуется относительно легко, то при измерениях ионов возникает ряд трудностей. Дело в том, что этим методом определяется только один параметр иона ( $E/q$ ) вместо трех: энергии  $E$ , массы  $m$  и заряда  $q$ . Однако при определенных условиях (низкие кинетические температуры и переносные скорости основных ионных компонент) и достаточно высокой чувствительности анализатора на энергетическом спектре выделяются, помимо основного протонного пика, несколько других пиков, соответствующих другим ионам. При определенных предположениях обработка этих пиков позволяет оценить не только содержание данного иона, но также и его гидродинамические параметры: переносную скорость и кинетическую температуру.

Более перспективным направлением изучения малых ионных составляющих солнечного ветра является использование масс-спектрометров, которые помимо электростатического анализатора, пропускающего ионы с определенным отношением  $E/q$ , включают в себя магнитные или электромагнитные фильтры, разделяющие частицы по величине скорости  $v$  и отношению массы иона к его заряду  $m/q$  [16, 119, Гальперин и др., 1972; Geiss, 1985]. Преимущества использования метода массового анализа очевидны: (1) более надежной становится идентификация пиков на энергетических спектрах, (2) возможно выделение пиков малых составляющих при высоких температурах основных компонент солнечного ветра. Однако масс-спектрометры имеют более низкую чувствительность, чем электростатические анализаторы, и, как правило, предназначаются для измерений лишь ограниченного набора сортов ионов.

Первые отдельные масс-спектрометрические измерения протонов и  $\alpha$ -частиц были выполнены на спутниках *Explorer 34* (год начала эксперимента – 1967) и *Прогноз 1* (1972). Указанные эксперименты имели определенные недостатки. Эксперимент на спутнике *Explorer 34* проводился в ограниченном динамическом диапазоне измерений, обусловленным повышенным уровнем шума в телеметрической системе [192, Ogilvie et al., 1968], в результате чего при малых величинах потока неопределенность в оцениваемых параметрах оказывалась значительной. В эксперименте на спутнике *Прогноз 1* из-за ограничений в телеметрической системе было низкое временное разрешение (полный цикл измерений спектров протонов и  $\alpha$ -частиц составлял  $\sim 44$  мин.), что сильно затруднило изучение относительного поведения параметров протонов и  $\alpha$ -частиц, особенно на участках сильной вариации параметров солнечного ветра [40, Зерцалов и др., 1976]. Кроме того, небольшой объем данных и отсутствие сканирования анализатора по углу (ось зрения анализатора была постоянно ориентирована вдоль направления на Солнце) не позволили достаточно надежно определить относительное содержание  $\alpha$ -частиц.

Прежде чем начать описание результатов экспериментов, проведенных в космическом пространстве, необходимо сделать одно общее замечание.

Результаты измерений, как правило, имеют большой разброс значений, вызванный как несовершенством используемых приборов, так и большой изменчивостью наблюдаемых параметров, поэтому описываемые ниже зависимости между отдельными параметрами носят статистический характер и достаточно наглядно проявляются только в усредненном виде, в то время как отдельные измерения могут заметно отличаться от средних значений. Определяемые по этим данным коэффициенты корреляции между параметрами поэтому часто оказываются очень низкими, и в этом случае справедливость вывода о существовании той или иной зависимости должна подтверждаться результатами других экспериментов с учетом условий их проведения.

### 1.3.2 Основные характеристики протонной компоненты

Все космические эксперименты показали, что лишь при редко встречающихся условиях очень холодного ( $T_p \leq 1.5 \cdot 10^4$  K) и медленного ( $v_p \leq 300$  км/с) солнечного ветра измеренные параметры согласуются с предсказаниями простой гидродинамической модели [133, Hartle and Sturrock], в которой плазма расширяется адиабатически и на гелиоцентрическом расстоянии 1 а.е. обладает гидродинамическими параметрами  $T_p \approx 4.4 \cdot 10^3$  K,  $v_p \approx 300$  км/с и  $n \approx 15$  см<sup>-3</sup>. Для предсказаний обычно наблюдаемых параметров солнечного ветра в такую простую модель необходимо включать дополнительные источники энергии, физическая природа которых (например, аномальная теплопроводность плазмы, поглощение плазмой энергии волн и возмущений и т.д.) была предметом исследований в ряде работ [77, 145, 140, Belcher, 1971; Hundhausen, 1973; Hollweg, 1978]. Хотя получаемые в этом случае гидродинамические параметры становятся ближе к реально наблюдаемым параметрам, вопрос об источниках или механизмах ускорения и нагрева солнечного ветра остается открытым, а точность совпадения предсказанных параметров со всей совокупностью наблюдаемых величин нельзя считать удовлетворительной.

Один из первых космических экспериментов на аппарате *Mariner 2* [179, Neugebauer and Snyder, 1962] (1962) показал прямую корреляцию температуры и обратную корреляцию концентрации со скоростью солнечного ветра [180, Neugebauer and Snyder, 1966]. Аналогичный результат был получен в эксперименте на спутнике *Vela 3* (1965), причем коэффициенты корреляции между этими параметрами составили, соответственно, 0.63 и -0.22 [205, Robbins et al., 1970], а также по данным спутников *IMP 1*, *Vela 3*, *Explorer 34*, *Heos 1* (1968) [96, Diodato et al., 1974] и *Heos 1*, *Vela 3*, *IMP 3* (1966) [115, Formisano et al., 1974].

Позже по данным, полученным на спутниках *Vela 3*, *Explorer 34* и *43* (1971) и на космическом аппарате *Pioneer 6* (1965), была проведена аппроксимация данных зависимости температуры протонов от их скорости в виде  $\sqrt{T_p}[10^3 \text{ K}] =$

$A \cdot v_p$  [км/с] +  $B$ , т.е. предполагалось, что изменение тепловой скорости протонов происходит пропорционально их переносной скорости [203, 88, 90, Pizzo et al., 1973; Burlaga et al., 1970; Burlaga et al., 1973]. Эти результаты представлены в Табл. 3.6. В указанных работах отмечалось, что помимо крупномасштабной зависимости температуры от скорости наблюдается также и отклонение от этой средней зависимости, причем эти отклонения связаны с градиентом скорости и, по-видимому, объясняются динамическими процессами в межпланетном пространстве, например, взаимодействием разноскоростных потоков солнечного ветра.

Чтобы выявить роль динамических процессов, в работе [172, Neugebauer, 1976] по данным 9-ти космических аппаратов была проведена аппроксимация измеренных значений температуры, концентрации и скорости для 14 периодов, когда кинетические параметры солнечного ветра практически не изменялись за характерное время расширения солнечного ветра  $\tau = r/2v_p$ , где  $r$  - гелиоцентрическое расстояние. Для такого "спокойного" солнечного ветра наклон регрессионной прямой (коэффициент  $A$ ) оказался меньше, чем для долговременных интервалов наблюдений без селекции данных.

В работе [100, Eyni and Steinitz, 1977] по данным космического аппарата *Mariner 2* (из работы [180, Neugebauer and Snyder, 1966]) была проведена аппроксимация результатов измерений в виде  $\lg T_p = A \lg v_p + B$ , и было выяснено, что  $A \approx 2$ . Этот результат, полученный на основе сравнительно небольшой статистики (около 80 усредненных за 1 - 5 суток измерений за 4 месяца полета КА), подтвердил правомерность использованной ранее аппроксимации в виде  $T_p^{1/2} = A v_p + B$ .

Зависимость температуры солнечного ветра  $T_p$  от гелиоцентрического расстояния  $r$  исследовалась по данным КА *Mariner 2* и *Helios 1* (1974), и результаты измерений аппроксимировались степенной функцией в виде  $T_p \sim r^A$ , при этом предполагалось, что зависимость температуры от скорости выражается формулой  $T_p \sim v_p^2$  [102, 103, Eyni and Steinitz, 1978a, 1978b]. Анализ показал, что лишь для медленного солнечного ветра охлаждение происходит по адиабатическому закону  $T_p \sim r^{-4/3}$ , однако в целом показатель  $A$  оказался зависящим от скорости солнечного ветра, т.е. наблюдается зависимость температуры солнечного ветра как от его скорости, так и от гелиоцентрического расстояния.

Определение количественной связи концентрации  $n$  солнечного ветра с его скоростью было выполнено по данным ряда КА, и эти результаты суммированы в Табл. 3.7. В частности, по данным спутника *Explorer 34* было получено, что  $n \sim v_p^{-1.5}$  [89, Burlaga and Ogilvie, 1970]. Аналогичный результат был получен по данным спутника *Vela 3* [203, Pizzo and Gosling, 1973]. Позже, по данным 9-ти космических аппаратов, для участков спокойного солнечного ветра было найдено, что  $n \sim v_p^{-2.13 \pm 0.31}$ , т.е. зависимость оказалась несколько более сильная [172, Neugebauer, 1976]. Еще более сильная зависимость  $n \sim v_p^{-3}$  была получена по данным космических аппаратов *Mariner 2* и *Vela 3* [100, Eyni and

Steinitz, 1977], поэтому вопрос о зависимости между концентрацией и скоростью солнечного ветра требовал дальнейшего изучения.

### 1.3.3 Крупномасштабная структура солнечного ветра

Полученные в ходе первых длительных космических экспериментов данные показали, что на временных масштабах  $\sim 1$  ч. и более (это соответствует пространственным масштабам  $\geq 1.5 \cdot 10^6$  км) солнечный ветер имеет определенную структуру, т.е. в межпланетной среде могут одновременно распространяться несколько различных типов течений СВ, характеризующиеся определенным набором параметров, которые внутри каждого из течений изменяются сравнительно мало или определенным образом [180, 144, Neugebauer and Snyder, 1966; Hundhausen, 1972]. Космические аппараты, сильно разнесенные в пространстве по гелиоцентрическому расстоянию и/или гелиодолготе (например, КА *Helios-1,2*), могут в одно и то же время регистрировать разные типы течений СВ.

Прежде всего были выделены квазистационарные и возмущенные течения. Квазистационарные течения разделялись на медленные (со скоростью менее 400 км/с) и быстрые (более 400 км/с), причем в медленных течениях выделялись области изменения полярности ММП, так называемый гелиосферный токовый слой (heliospheric current sheet - HCS) [108, Feldman et al., 1978]. К возмущенным типам течений были отнесены прежде всего межпланетные ударные волны (interplanetary shock - IS), так называемые "поршни" (piston) и коротирующие (corotating interaction region - CIR) потоки. Появления "поршней" и IS связывались с нестационарными процессами в солнечной короне и прежде всего с солнечными вспышками, когда вещество, выбрасываемое из солнечной атмосферы, образует "поршень", который генерирует IS [135, Hirshberg et al., 1970]. В более современной литературе термин "поршень" сменился на термин "выброс корональной массы" (coronal mass ejection - CME). Коротирующие течения CIR [125, Gosling et al., 1978] образуются, когда быстрое течение солнечного ветра догоняет медленное и в результате их динамического взаимодействия в межпланетной среде образуется возмущенное уплотнение плазмы, а в ряде случаев и коротирующие IS.

Образование быстрых и медленных течений солнечного ветра часто связывается, соответственно, с открытыми, в так называемых "корональных дырах" (coronal hole - CH), и закрытыми, в "корональных стримерах" (coronal streamer - CS), конфигурациями магнитных силовых линий в области формирования этих течений вблизи Солнца [154, 182, 184, 207, Krieger et al., 1973; Neupert and Pizzo, 1974; Nolte et al., 1976; Rosner and Vaiana, 1977]. При открытой конфигурации магнитного поля за счет сверхрадиального расширения потока плазмы в межпланетное пространство течение может ускоряться до высокой скорости с одновременным уменьшением концентрации. Однако, если расширение происходит адиабатически, то должно происходить и

сильное охлаждение течения, так как в этом случае увеличение переносной скорости течения происходит за счет тепловой энергии течения. Поэтому, хотя указанные работы и выдвигают гипотезу о связи высокоскоростных течений солнечного ветра с корональными дырами, в них не предлагаются конкретные механизмы нагрева таких течений для согласования с результатами наблюдений.

Таким образом квазистационарные структуры солнечного ветра связывались с крупномасштабной структурой солнечных магнитных полей, а возмущенные течения - с динамическими процессами в солнечной короне и межпланетной среде.

Однако систематический сравнительный анализ характеристик различных типов течений СВ как между собой, так и с различными явлениями и структурами солнечной короны, выполнен не был. И здесь можно отметить 2 аспекта. Во-первых, не был завершен процесс выявления типов течений СВ и их классификации на основе объективных критериев. Во-вторых, не для всех типов течений СВ было накоплено достаточно данных, чтобы можно было сделать статистически достоверные выводы как о величине параметров, так и об их взаимосвязях. Поэтому, как будет видно из последующего материала, ряд зависимостей был получен сначала для "бесструктурного СВ", и лишь позже некоторые зависимости были определены для разных типов течений СВ.

### 1.3.4 Элементный и зарядовый составы ионной компоненты

Первое наблюдение ионов более тяжелых, чем протоны, -  $\alpha$ -частиц - было выполнено на КА *Mariner 2* при полете аппарата к Венере [179, Neugebauer and Snyder, 1962]. По данным этого эксперимента, была оценена средняя величина относительного содержания  $\alpha$ -частиц в солнечном ветре  $n_\alpha/n_p = 4.6 \pm 3.8\%$  [180, Neugebauer and Snyder, 1966]. Неусредненные величины относительного содержания  $\alpha$ -частиц наблюдаются в достаточно широком диапазоне значений. Например, по данным спутника *Vela 3*, этот параметр наблюдался от 0.081 до 41.7% [205, Robbins et al., 1970], т.е. диапазон изменения составил  $\sim 500$  раз. После усреднения за период, сравнимый с периодом оборота Солнца (27 суток), значения относительной концентрации  $\alpha$ -частиц, полученные на различных космических аппаратах, меняются сравнительно мало и составляют 3-6% (см. Табл. 3.3.) Отметим, что средние значения содержания  $\alpha$ -частиц в солнечном ветре оказываются несколько ниже самой низкой оценки содержания гелия на солнечной поверхности  $6.3 \pm 1.5\%$  [156, Lambert, 1967].

Существование долгопериодических вариаций в цикле солнечной активности содержания гелия в солнечном ветре было предположено в работах [205, 114, Robbins et al., 1970,; Formizano et al, 1970] и позже подтверждено в многочисленных космических экспериментах [82, 185, 188, 108, Bollea et al., 1972; Ogilvie, 1972; Ogilvie and Hirshberg, 1974; Feldman et al., 1978]. Эти эксперименты показали, что относительное содержание  $\alpha$ -частиц в



солнечном ветре возрастает вблизи максимума солнечной активности. Однако экспериментальный материал охватывал лишь около одного солнечного цикла (1964-1976 гг.), поэтому было важно проверить эту гипотезу в следующем солнечном цикле.

При наблюдении изменений относительного содержания  $\alpha$ -частиц солнечного ветра на временных масштабах в несколько часов были обнаружены некоторые закономерности. Значительное увеличение содержания гелия (в 2-3 раза относительно среднего) наблюдается в течениях, образовавшихся в результате солнечных вспышек и регистрирующихся после прихода к аппарату межпланетных ударных волн и/или сопровождающихся внезапным началом геомагнитных бурь [70, 190, 135, 136, Bame et al., 1968; Ogilvie and Wilkerson, 1969; Hirshberg et al., 1970; Hirshberg et al., 1972]. Небольшое увеличение содержания гелия в высокоскоростных течениях солнечного ветра может быть связано с истечением плазмы из корональных дыр [74, Bame et al., 1977]. Закономерности изменения параметров  $\alpha$ -частиц относительно протонов в области взаимодействия разноскоростных течений исследовались методом наложения эпох в работах [138, 125, Hirshberg et al., 1974; Gosling et al., 1978], в которых было показано, что эти изменения невелики по величине (в среднем  $n_\alpha/n_p$  меняется от  $\sim 4\%$  в низкоскоростном течении до  $\sim 6\%$  в высокоскоростном течении) и не вносят существенного вклада в определение средних параметров по промежуткам времени, существенно превышающим сутки.

По данным спутника *Vela 3*, была обнаружена положительная корреляция между относительной концентрацией  $\alpha$ -частиц и скоростью солнечного ветра [205, Robbins et al., 1970], а в работах [137, 185, 167, 188, Hirshberg et al., 1972b; Ogilvie, 1972; Moreno and Palmiotto, 1973; Ogilvie and Hirshberg, 1974] определялись коэффициенты линейной регрессии этих параметров (см. Табл. 3.8). На основании результатов нескольких экспериментов были выдвинуты две гипотезы: (1) в цикле солнечной активности с ростом числа пятен увеличивается среднее содержание  $\alpha$ -частиц независимо от скорости солнечного ветра (т.е. возрастает свободный член  $B$  в линейной функции  $n_\alpha/n_p = A v_p + B$ ), (2) в максимуме солнечной активности возрастает число событий, в которых наблюдаются высокоскоростные течения с более высоким содержанием  $\alpha$ -частиц (т.е. возрастает коэффициент линейной регрессии  $A$ ) [188, Ogilvie and Hirshberg, 1974]. Последняя гипотеза представлялась более обоснованной, так как в событиях, связанных с сильными солнечными вспышками, действительно наблюдались течения, обогащенные гелием [135, 136, Hirshberg et al., 1970; Hirshberg et al., 1972], а число солнечных вспышек возрастает вблизи максимума солнечной активности.

Косвенная оценка зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц от температуры солнечного ветра была получена в работе [185, Ogilvie, 1972]. В указанной работе сначала была определена линейная связь содержания  $\alpha$ -частиц и скорости (см. Табл. 3.8), а затем на основе связи температуры и скорости солнечного ветра [88, Burlaga and Ogilvie, 1970] (см. Табл. 3.6) была

получена зависимость  $(n_\alpha/n_p)10^2 = 0.28(\sqrt{T_p}[10^3 K]) + B$ , где  $B$  является слабой функцией солнечной активности. Других оценок зависимости содержания гелия от температуры солнечного ветра опубликовано не было.

В работе [190, Ogilvie and Wilkerson, 1969], по данным спутника *Explorer 34*, исследовалась зависимость относительной концентрации  $\alpha$ -частиц от концентрации протонов солнечного света. Полученные данные показали, что, возможно,  $n_\alpha/n_p$  уменьшается с ростом  $n$ , что, в принципе, согласуется с полученными зависимостями между скоростью и концентрацией (см. Табл. 3.7) и между содержанием гелия и скоростью солнечного ветра (см. Табл. 3.8). Однако, по данным спутника *Heos 1*, никакой зависимости между содержанием  $\alpha$ -частиц и концентрацией солнечного ветра обнаружено не было [114, Formisano et al., 1970], поэтому вопрос о связи относительного содержания гелия и полной концентрацией ионов солнечного ветра требует дальнейшего изучения.

Одним из возможных механизмов, обеспечивающих выход тяжелых ионов из солнечной короны в межпланетное пространство, является увлечение их основным потоком протонов (за счет кулоновских соударений), когда величина потока превышает некоторый минимальный порог потока [121, Geiss et al., 1970]. Однако наблюдения на спутниках *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *Explorer 43* [185, Ogilvie, 1972] и *Vela 3* [137, Hirshberg et al., 1972b] продемонстрировали уменьшение содержания  $\alpha$ -частиц с ростом величины потока протонов солнечного ветра. Единственным экспериментом, в котором наблюдалось небольшое увеличение содержания гелия при возрастании потока, был эксперимент на спутнике *Explorer 34* [185, Ogilvie, 1972]. Но в этом эксперименте была низкой чувствительность прибора, и при малых величинах потока неопределенность оцениваемых параметров может быть значительной [192, Ogilvie et al., 1968]. В целом результаты по изменению содержания  $\alpha$ -частиц с ростом потока солнечного ветра не согласуются с предсказаниями моделей [121, Geiss et al., 1970].

Таким образом наблюдаемое среднее содержание гелия в солнечном ветре ниже соответствующих оценок его содержания на Солнце, при этом содержание гелия зависит от механизмов выхода плазмы в межпланетное пространство и/или от его содержания в тех областях солнечной атмосферы, из которых берут свое начало наблюдаемые течения. Связь содержания гелия в солнечном ветре и параметров течения достаточно подробно исследована лишь для переносной скорости, а для выявления механизмов формирования течений необходимо изучать связь и с другими параметрами, в частности, с кинетической температурой и концентрацией.

В отличие от  $\alpha$ -частиц, наблюдение которых проводилось достаточно систематически, более тяжелые ионы из-за методических трудностей наблюдались лишь эпизодически и при определенных условиях в солнечном ветре, поэтому полученные результаты по тяжелым ионам могут рассматриваться только как оценки, относящиеся к тому или иному событию в солнечном ветре.

Энергетические спектры солнечного ветра, полученные с помощью

электростатических анализаторов достаточно высокой чувствительности, содержат, кроме пиков протонов и  $\alpha$ -частиц, пики более тяжелых ионов. По данным спутника *Vela 3* были получены спектры, содержащие пики, интерпретированные как ионы  $^1H^+$ ,  $^3He^{+2}$ ,  $^4He^{+2}$ ,  $^{16}O^{+7}$ ,  $^{16}O^{+6}$  и  $^{16}O^{+5}$  [69, Vame et al., 1968]. Последующие измерения на спутниках *Vela 3, 5, 6* [71, 142, 157, 73, Vame et al., 1970; Holzer and Axford, 1970; Lange and Scherb, 1970; Vame et al., 1975] позволили получить более подробные спектры ионов солнечного ветра.

Для интерпретации пиков на энергетических спектрах в этих работах делались два предположения: (1) все ионы движутся с одинаковыми переносными скоростями, и (2) распространенность химических элементов в солнечном ветре не очень сильно отличается от их распространенности в атмосфере Солнца, полученной по оптическим данным. При первом предположении, принимая энергию каждого иона равной  $mv_p^2/2$ , где  $v_p$  - переносная скорость протонов, а  $m$  - масса иона, легко от шкалы  $E/q$  (энергия на заряд иона) перейти к шкале  $M/q$ , где  $M$  и  $q$  - массовое и зарядовое число иона, соответственно. Второе предположение позволяет по величине  $M/q$  идентифицировать пики, соответствующие различным ионизационным состояниям кислорода, кремния и железа с возможными вкладами от ионов азота, серы и других менее распространенных элементов (см. Рис. 1.1).

Похожие, но менее подробные спектры были сделаны по данным спутника *Heos 1* [92, Cattaneo et al., 1971]. Чтобы получить достаточно полный спектр по данным спутника *Heos 2*, в работе [131, Grunwaldt, 1976] были суммированы за период с 13 UT 25 апреля по 08 UT 27 апреля 1972 г. индивидуальные спектры в шкале  $M/q$ , для которых все кинетические параметры были близкими, за исключением медленно изменяющейся переносной скорости солнечного ветра. Полученный спектр был аналогичен спектрам, полученным ранее.

По высотам пиков на энергетических спектрах ионов, измеренных на спутниках серий *Vela* и *Heos* было оценено содержание ряда химических элементов в солнечном ветре. Оценки упрощались предположением, что формы всех пиков очень близки друг к другу [71, Vame et al., 1970]. Полученные в этих экспериментах данные о среднем содержании кислорода, кремния и железа в солнечном ветре, а также в конвективной зоне Солнца, суммированы в работе [118, Geiss, 1982] и представлены в Табл. 1.3.

Во время лунных экспедиций *Apollo 11* и *12* экспонировались металлические фольги, обработка которых позволила оценить потоки гелия и изотопов инертного газа неона:  $^4He/^{20}Ne = 620 \pm 70(430 \pm 90)$ ,  $^{20}Ne/^{22}Ne = 13.1 \pm 0.6(13.5 \pm 1.0)$  и  $^{22}Ne/^{21}Ne = 26 \pm 12$  (в скобках даны значения, полученные по данным *Apollo 11*, без скобок - *Apollo 12*) [120, Geiss et al., 1970]. По тем же данным была определена относительная концентрация изотопов гелия  $^4He/^3He = 2.3 \cdot 10^3$  [117, Geiss et al., 1972].

Исследование изотопов  $^3He^{+2}$  и  $^3H^+$  было проведено на космических аппаратах *Союз 4,5,9*, *Луна 16* и *Зонд*. Были получены следующие результаты:

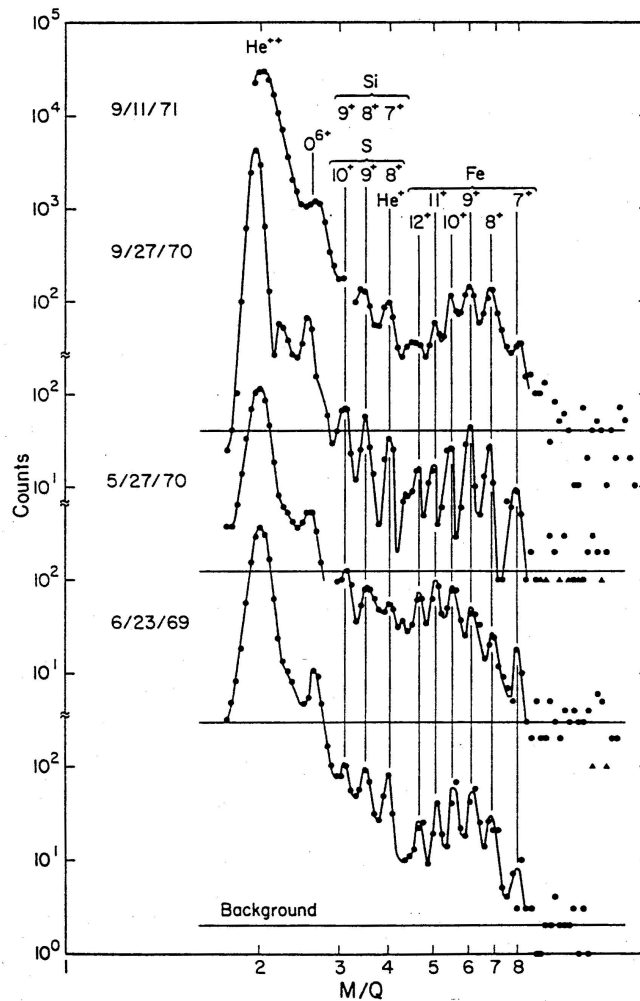


Рис. 1.1: Примеры массовых спектров ионов солнечного ветра, полученных в предположении равенства переносных скоростей всех ионных компонент из энергетических спектров, измеренных на спутниках *Vela 5,6* [72, Vame et al., 1974]. Вертикальные линии указывают положение наиболее распространенных ионных компонент.

поток ионов  ${}^3\text{H}^+$  в среднем за 70 часов составил  $1.4 \cdot 10^7$  атомов/см<sup>2</sup>, а ионов  ${}^3\text{He}^{+2} - 3 \cdot 10^6$ . При этом наблюдался период, когда потоки этих ионов возросли примерно на два порядка [83, Boltentkov et al., 1970].

В работе [261, Zinner et al., 1974] по анализу кратеров на слюдяных пластинах были оценены потоки наиболее энергичных ионов солнечного ветра. Предполагалось, что это потоки железа, и его содержание относительно протонов составляет  $\sim 4.5 \cdot 10^{-5}$ , что согласуется с оценками, полученными с помощью электростатических анализаторов [118, Geiss, 1982].

Таким образом содержание гелия в солнечном ветре оказывается несколько ниже всех оценок его содержания на Солнце. Что касается более тяжелых элементов, то учитывая большую неопределенность оцениваемых параметров в использованных методах, изменчивость потоков тяжелых ионов и сравнительно

небольшую статистику экспериментального материала, был сделан вывод, что сравнение результатов измерения среднего химического состава солнечного ветра с химическим составом солнечной атмосферы, полученным в результате астрономических наблюдений, можно считать удовлетворительным (см. Табл. 1.3 ).

### 1.3.5 Оценки температуры солнечной короны по наблюдениям тяжелых ионов солнечного ветра

На основании расчетов относительного содержания ионов разных степеней ионизации для ряда химических элементов как функции температуры электронов солнечной атмосферы (в предположении ионизационного равновесия) [150, 63, Jordan, 1969; Allen and Dupree, 1969] данные различных экспериментов обрабатывались для получения оценок температуры электронов короны (ионизационной температуры). По данным спутников серии *Vela*, ионизационная температура, усредненная по различным парам ионов железа, составила  $\sim 1.5 \cdot 10^6 \text{K}$  [72, Vame et al., 1974]. При обработке энергетических спектров, измеренных на спутнике *Heos 2*, по совокупности пиков ионов железа была получена оценка  $\sim 1.26 \cdot 10^6 \text{K}$ , а по ионам кислорода - несколько выше  $\sim 2 \cdot 10^6 \text{K}$  [131, Grunwaldt, 1976].

Однако результаты измерений не согласовывались с предположением об изотермичности короны на малых высотах. Была предложена модель, в которой температурный градиент задавался в форме  $T_e \sim r^{-B}$  [72, Vame et al., 1974], и параметр  $B$  находился по экспериментальным данным. В результате было получено, что  $B = 0.3$  (или  $2/7$ ), при этом из сравнения с моделью следовало, что по отношению пиков кислорода ионизационная температура равна  $\sim 2.1 \cdot 10^6 \text{K}$ , и ионы  $O^{+6}$  и  $O^{+7}$  "замораживаются" на высоте  $\sim 1.5 R_o$  ( $R_o$  - солнечный радиус), ионы  $Si^{+9} - Si^{+7}$  на высоте  $2.4 - 2.8 R_o$ , ионы  $Fe^{+13} - Fe^{+7}$  - на высоте  $2.6 - 3.9 R_o$ , а ионизационная температура, определенная по ионам железа, составляет  $\sim 1.5 \cdot 10^6 \text{K}$ .

В целом, оценки температуры электронов в солнечной короне, полученные по наиболее часто встречающимся спектрам ионов солнечного ветра, хорошо согласуются с современными представлениями об условиях в спокойной солнечной короне.

### 1.3.6 Массовые скорости ионных компонент

Соотношение между массовыми скоростями различных ионов солнечного ветра (также как и между их кинетическими температурами) дает важную информацию об условиях и механизмах ускорения ионных компонент в солнечной короне, а также о динамических процессах в межпланетной среде.

В первых космических экспериментах при интерпретации второго пика на спектрах, измеренных в шкале  $E/q$ , предполагали близость массовых

скоростей двух компонент и идентифицировали второй пик как  $\alpha$ -частицы (ионы  ${}^4\text{He}^{+2}$ ). Этот метод был использован при обработке спектров ионов, полученных на космических аппаратах *Mariner 2* [180, Neugebauer and Snyder, 1966] и *Vela 3* [69, Bame et al., 1968]. Справедливость такой интерпретации второго пика, а следовательно, предположения о близости их массовых скоростей, подтвердили независимые эксперименты на спутниках *Explorer 34* [192, Ogilvie et al., 1968] и *Прогноз 1* [40, Зерцалов и др., 1976], на которых были выполнены первые отдельные масс-спектрометрические измерения протонов и  $\alpha$ -частиц, а также эксперименты на космических аппаратах *Apollo 11* и *12*, в которых металлические образцы, находившиеся под действием солнечного ветра, исследовались в земных лабораториях [120, Geiss et al., 1970]. Это предположение было использовано и при интерпретации других пиков на энергетических спектрах ионов солнечного ветра. В результате были получены самосогласованные массовые спектры, содержащие пики ионов гелия, кислорода, кремния и железа (см. раздел 1.3.4). Таким образом, первые космические измерения послужили основой для предположения, что все ионные компоненты солнечного ветра движутся с приблизительно равными массовыми скоростями. Последующие измерения, в том числе и методами масс-анализа, подтвердили этот вывод и позволили уточнить соотношения скоростей различных ионных компонент солнечного ветра.

Статистический анализ результатов многочисленных космических экспериментов показал, что в действительности массовая скорость  $\alpha$ -частиц в среднем на 0,1-3,5% превышает скорость протонов, при этом гистограммы распределения отношения скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha/v_p$  являются достаточно узкими, так что среднеквадратичные отклонения от среднего обычно составляют  $\pm(2.5 - 5)\%$  (см. Табл. 3.4).

Для изучения механизмов ускорения ионов солнечного ветра важно исследовать массовые скорости различных ионов при разных условиях в солнечном ветре. По данным масс-спектрометрических измерений на спутнике *Прогноз 1*, было обнаружено, что обычно за фронтом межпланетных ударных волн в течение периода от нескольких десятков минут до нескольких десятков часов переносная скорость  $\alpha$ -частиц может быть на 50-70 км/с меньше скорости протонов, а затем соотношение между скоростями  $\alpha$ -частиц и протонов становится обычным для солнечного ветра [41, Зерцалов и др., 1976b]. Так как такие явления наблюдаются сравнительно редко и их продолжительность невелика, то они не вносят существенного вклада в средние соотношения между скоростями этих ионов при изучении крупномасштабных вариаций параметров солнечного ветра, однако дают ценную информацию о механизмах формирования межпланетных ударных волн.

По результатам измерений на спутниках *Vela 3* [138, Hirshberg et al., 1974] и *IMP 6,7,8* [108, Feldman et al., 1978] отмечалось увеличение разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов в высокоскоростных потоках солнечного ветра. В среднем разность скоростей  $v_\alpha - v_p$  (или векторная разность  $\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p$ ) почти

линейно растет с увеличением скорости солнечного ветра, что подтверждается результатами определения зависимости модуля векторной разности этих скоростей от скорости протонов, полученные по данным спутников *IMP 6* и *7* [65, Asbridge et al., 1976] и *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978]. В частности, данные спутников *IMP 6* и *7* для скоростей ветра более 400 км/с были аппроксимированы следующими зависимостями  $|\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p|$  [км/с] = 0.08  $v_p$  [км/с] - 23 или  $v_\alpha - v_p$  [км/с] = 0.032  $v_p$  [км/с] - 12.

Анализ изменения гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц вблизи области взаимодействия разноскоростных течений солнечного ветра, выполненный методом наложения эпох [125, Gosling et al., 1978], показал, что в течение 2-х суток после прохождения границы низкоскоростного и высокоскоростного течений наблюдается некоторое увеличение разности массовых скоростей (до  $\sim 20$  км/с) и отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов. Перемешивание высокоскоростного течения, которое обычно имеет более высокое относительное содержание гелия [205, 137, 185, 167, 188, Robbins et al., 1970; Hirshberg et al., 1972b; Ogilvie, 1972; Moreno and Palmiotto, 1973; Ogilvie and Hirshberg, 1974], с низкоскоростным течением может быть причиной наблюдаемого различия массовых скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов в солнечном ветре [101, 13, Eyni and Steinitz, 1977; Веселовский, 1978].

С одной стороны, в высокоскоростных течениях солнечного ветра возрастает амплитуда альвеновских волн [78, Belcher and Davis, 1971], а с другой стороны, в ряде моделей рассматривается взаимодействие волн с ионами для объяснения преимущественного ускорения более тяжелых ионов, чем протоны [93, 66, 141, 166, Chang and Hollweg, 1976; Auer and Rosenbauer, 1977; Hollweg and Turner, 1978; McKenzie et al., 1978]. Поэтому по данным спутника *IMP 6* для высокоскоростного течения в период с 30 марта по 2 апреля 1971 г. было проведено сравнение разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов с величиной альвеновской скорости  $v_A$  и получена прямая корреляция этих параметров (линейная аппроксимация имеет вид  $|\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p|$  [км/с] =  $v_A$  [км/с] - 25) [65, Asbridge et al., 1976]. На основании этого был сделан вывод, что альвеновская скорость может служить мерой величины разности скоростей ионов, поэтому во многих последующих работах изучается поведение безразмерной величины  $(v_\alpha - v_p)/v_A$ .

С другой стороны, оценки показали, что кулоновские столкновения между ионами при определенных условиях в течении (плотный, медленный и холодный солнечный ветер) могут заметно уменьшить разность переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов [173, 132, Neugebauer, 1976; Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], что должно вопреки действию механизмов преимущественного ускорения тяжелых ионов устанавливать термодинамическое равновесие с равными массовыми скоростями всех ионов.

Эти результаты позволили высказать гипотезу о том, что где-то вблизи Солнца неизвестный механизм ускоряет  $\alpha$ -частицы и другие тяжелые ионы до скоростей, которые превышают величину скорости протонов на величину

альвеновской скорости, а при дальнейшем движении в межпланетном пространстве эта разность скоростей уменьшается за счет кулоновского трения [173, Neugebauer, 1976].

### 1.3.7 Кинетические температуры ионных компонент

Также как и разность массовых скоростей, различие кинетических температур ионов солнечного ветра указывает на отсутствие термодинамического равновесия между ионными компонентами течения плазмы.

Наилучшая аппроксимация измеренных на космическом аппарате *Mariner 2* спектров достигалась при предположении, что  $T_\alpha = 4T_p$  [180, Neugebauer and Snyder, 1966]. Последующие эксперименты на спутниках *Explorer 34* [190, 88, 191, Ogilvie and Wilkerson, 1969; Burlaga and Ogilvie, 1970; Ogilvie and Zwally, 1972], *Vela 3* [205, Robbins et al., 1970] и *Прогноз 1* [40, Зерцалов и др., 1976] показали, что в среднем отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов близко к 4 (или приблизительно равно отношению их масс), что означает близость тепловых скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов (см. Табл. 3.5). При этом обращалось внимание на то, что если это соотношение между температурами справедливо и для других ионов, то при обычной температуре протонов солнечного ветра  $\sim 10^5\text{K}$  кинетическая температура ионов железа достигает величины  $\sim 5 \cdot 10^6\text{K}$ , что заметно превосходит оценки средней температуры солнечной короны и указывает на существование механизмов преимущественного нагрева тяжелых ионов солнечного ветра [111, Feynman, 1975].

Изучение зависимости средних величин  $T_\alpha/T_p$  от скорости протонов для двух космических экспериментов *Vela 3* [111, Feynman, 1975] и *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977] показало, что величина отношений кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов коррелирует с величиной массовой скорости  $v_p$  солнечного ветра. Корреляция отношения температур ионов со скоростью солнечного ветра в некотором смысле аналогична упомянутым выше корреляциям параметров  $n_\alpha/n_p$  и  $v_\alpha/v_p$  (или параметра  $v_\alpha - v_p$ ) со скоростью ветра. По данным спутника *Прогноз 1* было обнаружено, что параметры  $T_\alpha/T_p$  и  $v_\alpha - v_p$  имеют слабую обратную корреляцию [86, Bosqued et al., 1977]. Однако, как отмечалось выше, из-за большого разброса данных полученные зависимости могут содержать большую неопределенность. Поэтому для решения вопроса о связи отношения температур и разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов в солнечном ветре требуется анализ данных дополнительных экспериментов.

В ряде теоретических моделей предполагается, что взаимодействие волн с ионами может обеспечить не только преимущественное ускорение тяжелых ионов, но и их преимущественный нагрев [141, 166, Hollweg and Turner, 1978; McKenzie et al., 1978]. Например, в последней модели были получены указания на то, что возможно существование в солнечном ветре соотношения между кинетическими температурами ионов и протонов  $T_i/T_p \approx M_i/M_p$ , однако при



этом величина отношения температур ионов и протонов антикоррелирует со скоростью солнечного ветра, и при обычно наблюдаемом в солнечном ветре спектре флуктуации потока скорости тяжелых ионов не могут превысить скорости протонов, что не соответствует результатам наблюдений.

В работе [106, Feldman et al., 1974] было предположено, что кулоновские столкновения могут выравнивать кинетические температуры ионов солнечного ветра аналогично тому, как они выравнивают их переносные скорости, и получено, по данным спутника *IMP 6* (для периода март 1971 - май 1972 г.), что отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов падает от  $\sim 6$  до  $\sim 1$  при изменении соотношения времени расширения (распространения) солнечного ветра к времени обмена энергией при столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  от величины  $\sim 10^{-3}$  до  $\sim 1$ . Аналогичные результаты были получены по данным спутника *OGO 5* [173, Neugebauer, 1976]. Подобно тому, как это было сделано для объяснения существования в солнечном ветре разности массовых скоростей тяжелых ионов и протонов, было предположено, что существует неизвестный механизм преимущественного нагрева тяжелых ионов, при этом за счет обмена энергией при соударениях ионов их кинетические температуры стремятся сравняться [111, 173, Feynman, 1975; Neugebauer, 1976]. Такое объяснение испытывает те же трудности, которые отмечались при аналогичном объяснении существования разности скоростей ионных компонентов солнечного ветра.

## 1.4 Солнечно-земные связи

Под солнечно-земными связями обычно понимается вся совокупность солнечных прямых и опосредованных воздействий на процессы в околоземном пространстве и на Земле (см. Рис. 1.2). При этом обычно обратное воздействие Земли на Солнце считается пренебрежимо малым, а по сложившейся традиции из анализа исключаются стационарные эффекты и анализируются главным образом процессы передачи возмущений вдоль всей цепочки. В нашем случае изучаются лишь те связи, которые обусловлены передачей воздействия с помощью солнечного ветра.

В целом концепцию, описывающую связь геомагнитных явлений с процессами на Солнце, можно представить следующим образом. Источником энергии геомагнитных явлений является Солнце, которое с помощью потоков солнечного ветра передает энергию магнитосфере Земли. Энергия от солнечного ветра поступает в магнитосферу лишь в случае, когда межпланетное магнитное поле (ММП) имеет заметную компоненту, параллельную земному магнитному диполю, т.е. приблизительно отрицательную (южную) компоненту  $B_z$  ММП [208, Rostoker and Falthammar, 1967]. В случае, когда скорость поступления энергии выше скорости ее диссипации, энергия накапливается в магнитосфере. Когда ее количество достигает и превышает некоторый определенный уровень, любое небольшое возмущение вне или внутри

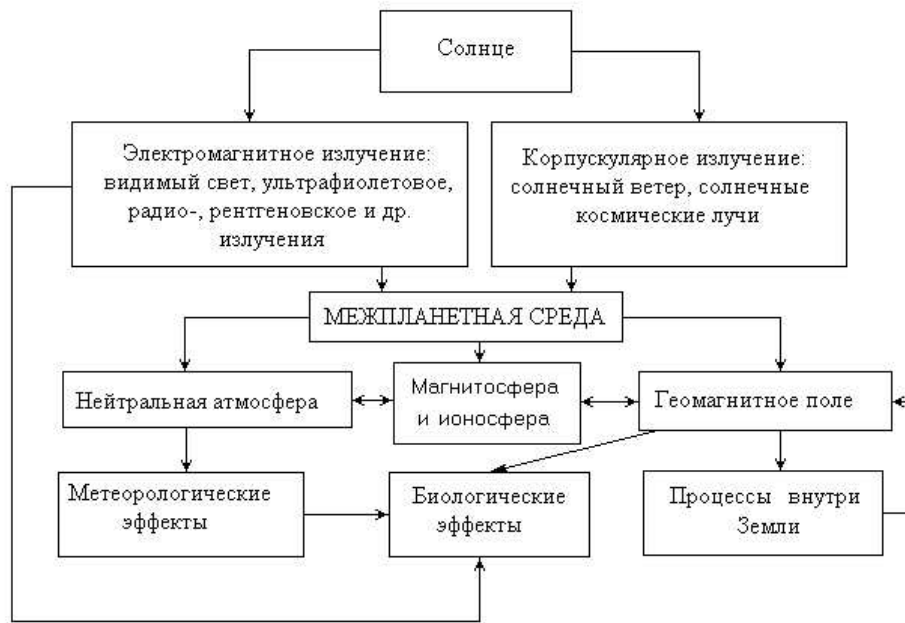


Рис. 1.2: Схема солнечно-земных связей.

магнитосферы может привести к выделению этой энергии (так называемый "триггерный" механизм) в виде пересоединения магнитных силовых линий, глобальной перестройки токовой системы магнитосферы и нагрева/ускорения плазмы, т.е. к магнитосферному возмущению. К таким возмущениям относятся сравнительно небольшие возмущения в полярных областях магнитосферы (суббури) и сильные глобальные (в том числе и в приэкваториальной области магнитосферы) возмущения (магнитные бури) [62, 210, 200, Akasofu, 1964; Russell et al., 1974; Perreault and Akasofu, 1978].

Квазистационарный солнечный ветер обычно не содержит длительных интервалов южной компоненты ММП, т.к. поле в основном лежит в плоскости эклиптики. Однако иногда в солнечном ветре распространяются крупномасштабные возмущения, такие как межпланетные ударные волны (interplanetary shock - IS), магнитные облака (magnetic cloud - MC), области сжатия на границе разноскоростных течений (corotating interaction region - CIR) и некоторые другие, которые или содержат внутри себя, или модифицируют окружающую среду таким образом, что в солнечном ветре в течение нескольких часов может присутствовать заметная южная компонента  $B_z$  ММП. Такое поведение ММП может привести к накачке магнитосферы энергией и возбуждению магнитосферных возмущений. [208, 210, 200, Rostoker and

Falthammar, 1967; Russell et al., 1974; Perreault and Akasofu, 1978].

## 1.5 Постановка задачи исследований

Анализ состояния проблемы изучения солнечного ветра во второй половине 70-х годов показал наряду с другими трудностями наличие двух основных нерешенных проблем: (1) слишком большой диапазон наблюдаемых параметров межпланетной среды, который нельзя объяснить в рамках однородных и стационарных моделей солнечной короны и солнечного ветра, и (2) неоднозначность ряда соотношений, наблюдаемых между некоторыми параметрами солнечного ветра. Эти трудности могут быть устранены, если предположить наличие различных по свойствам крупномасштабных структур и нестационарностей в солнечной короне и межпланетной среде, так как и большая изменчивость параметров, и неоднозначность наблюдаемых между ними соотношений могут возникать, если в различных типах течений в короне и солнечном ветре действуют разные физические механизмы. Таким образом различия характеристик разных типов течений солнечного ветра могут дать существенную информацию для понимания механизмов нагрева солнечной короны и формирования солнечного ветра при разных условиях в солнечной атмосфере.

Поэтому основные задачи диссертации перед экспериментами на спутниках *Прогноз 7, 8, 10, 11 и 12* по изучению структуры солнечного ветра, ее связи с солнечной короной и роли в солнечно-земной физике могут быть сформулированы следующим образом:

- 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.

## Глава 2

# Методика измерений и обработки данных

Исследованные в работе данные об ионных составляющих солнечного ветра были получены в основном на искусственном спутнике Земли *Прогноз 7* с помощью плазменного спектрометра СКС-04. Эти данные были дополнены результатами измерений на спутниках *Прогноз 8* с помощью прибора СКС-04 и советско-чехословацкого прибора МОНИТОР и *Прогноз-10-Интеркосмос* с помощью советско-чехословацкого плазменного комплекса БИФРАМ.

Для изучения отклика магнитосферы на явления в межпланетной среде в работе также использовались данные измерений в магнитосфере Земли на спутниках *Интербол/Хвостовой Зонд* с помощью российско-кубинского прибора КОРАЛЛ и *Интербол/Авроральный Зонд* с помощью французского прибора ИОН.

## 2.1 Условия проведения экспериментов

Параметры орбит 5-ти спутников приведены в Табл. 2.1. Спутник *Прогноз 7* [43, Карачевский и др., 1984] был выведен 30 октября 1978 г. на орбиту с апогеем  $\sim 203000$  км и периодом обращения вокруг Земли  $\sim 98$  ч. Угол между линией апсид орбиты спутника и плоскостью эклиптики определяется наклоном орбиты относительно экватора и датой запуска (т.е. наклоном оси вращения Земли относительно плоскости эклиптики в момент старта спутника). Для спутника *Прогноз 7* линия апсид орбиты спутника составила угол  $80^\circ$  к плоскости эклиптики. Спутник стабилизируется вращением с периодом около 2 минут вокруг продольной оси. За счет орбитального движения Земли вокруг Солнца угол между осью вращения спутника и направлением на Солнце изменяется со скоростью  $\sim 1$  градус/сутки, однако система ориентации спутника осуществляет изменение ориентации аппарата таким образом, что его продольная ось всегда находится внутри конуса с раствором  $\pm 10^\circ$  относительно оси Земля - Солнце [43, 55, Карачевский и др., 1984; Стефанович и др., 1984].

Таблица 2.1: Параметры орбит спутников *Прогноз 7, 8, 10, 11 и 12.*

Спутник	Дата запуска	Перигей/апогей начальные, км	Наклонение начальное, град.	Период оборота вокруг Земли, мин.
Прогноз 7	30 октября 1978	472/202627	64.9	5881.1
Прогноз 8	25 декабря 1980	978/197364	65.8	5687.8
Прогноз 10 (Интершок)	26 апреля 1985	5975/194734	65	5783.7
Прогноз 11 (Интербол-1*)	2 августа 1995	505/193064	63.8	5472
Прогноз 12 (Интербол-2**)	29 августа 1996	782/19140	62.8	347
* - Интербол/Хвостовой зонд				
** - Интербол/Авроральный зонд				

Положение и форма орбиты высокоапогейного спутника сохраняются в абсолютной системе координат. Спутник *Прогноз 7* был запущен в вечерний сектор (угол между проекцией на плоскость эклиптики линии апсид орбиты и направлением на Солнце составил  $\sim 100^\circ$ ) и за счет орбитального движения Земли в период с ноября 1978 г. по июль 1979 г. пересек полуденную меридианальную плоскость и сместился в утренний сектор [53, Прохоренко, 1984]. Благодаря таким образом выбранной орбите спутник находился в невозмущенном геомагнитосферой солнечном ветре от 50 до 70% времени периода оборота спутника вокруг Земли.

Спутники *Прогноз 8* и *10*, запущенные 25.12.80 г. и 26.04.85 г., имели близкие характеристики орбит: максимальное удаление от Земли  $\sim 199000$  и  $\sim 207000$  км, период оборота вокруг Земли  $\sim 95$  и  $\sim 96$  ч., угол между линией апсид орбиты спутника и плоскостью эклиптики  $45^\circ$  и  $25^\circ$ , соответственно. Оба спутника были также, как и *Прогноз 7*, запущены в вечерний сектор: углы между проекциями на плоскость эклиптики линий апсид орбит и направлением на Солнце составили  $\sim 90^\circ$  и  $\sim 85^\circ$ , соответственно.

Периоды проведения измерений на трех спутниках охватывают следующие временные интервалы: *Прогноз 7* - ноябрь 1978 г. - июль 1979 г., *Прогноз 8* - декабрь 1980 - сентябрь 1981 г., *Прогноз-10-Интеркосмос* - апрель - октябрь 1985 г. При анализе использовались данные спутников *Прогноз 11, 12* в период от начала их работы до конца 1998 г.

## 2.2 Описание аппаратуры

Используемые спектрометры плазмы СКС-04 (*Прогноз 7, 8*), МОНИТОР (*Прогноз 8*) и БИФРАМ (*Прогноз-10-Интеркосмос*) включают в себя 4 типа датчиков: (1) датчики для измерений интегрального суммарного потока ионов всех энергий и электронов с энергией более 100 эВ, (2) датчики для измерения

энергоугловых распределений ионов без селекции по массе, (3) датчики для селективных измерений энергетических распределений протонной и  $\alpha$ -компонент и (4) датчик для отдельных измерений ионов с отношением массы к их заряду  $M/q$  от 2 до 8. Указанные приборы содержат различные комбинации по числу и типу этих датчиков, основные характеристики которых представлены в Табл. 2.2. Комбинированный спектрометр СКС-04 включает первые три системы датчиков и подробно описывается в работах [7, 45, 8, 10, 36, Вайсберг и др., 1971; Климашов и Коваленко, 1974; Вайсберг и др., 1979; Вайсберг и др., 1981; Застенкер и др., 1981]. Масс-энерго-спектрометр ДФП-М комплекса БИФРАМ представляет собой датчик четвертого типа и подробно описывается в работах [17, 47, 18, 31, Гартманов и др., 1983; Кочаров и др., 1984; Гартманов и др., 1985; Ермолаев и др., 1986]. Ниже, на примере приборов СКС-04 и ДФП-М, будут даны краткие описания датчиков четырех типов и приведены данные, которые необходимы для дальнейшего изложения результатов работы.

### 2.2.1 Электростатические анализаторы ионов без селекции по массе

В приборе СКС-04 измерение энергетических (при фиксированных значениях отношения энергии частицы к величине ее заряда  $E/q$ ) и угловых распределений производится с помощью трех идентичных датчиков, представляющих собой цилиндрические электростатические анализаторы с канальными электронными умножителями типа ВЭУ-6М в качестве детекторов. Датчики выполнены в виде типовых модулей, близких по конструкции к описанным в [7, Вайсберг и др., 1971] и включающих в себя коллиматор (1), систему сеток (2), цилиндрические пластины дефлектора, на которые подается ступенчатое парафазное напряжение, (3) и детектора (4) (см. Рис. 2.1). Модули развернуты относительно друг друга в одной плоскости таким образом, что оси апертур боковых анализаторов отклонены на углы  $+7,5^\circ$  и  $-7,5^\circ$  относительно оси центрального анализатора, установленного вдоль оси спутника, ориентированной на Солнце [8, Вайсберг и др., 1979].

Экспериментальная калибровка датчиков спектрометра СКС-04 проводилась на вакуумном стенде с помощью пучков протонов,  $\alpha$ -частиц и электронов. Определялись форма энергетических и угловых характеристик и абсолютная чувствительность каждого датчика, необходимые для интерпретации результатов измерений. Измеренные характеристики электростатических анализаторов (см. Табл. 2.2) имеют достаточно гладкую форму до уровня  $\sim 10^{-3}$  от максимума, а полная ширина на полувысоте для энергетической характеристики составляет  $\sim 7\%$ , а для угловой -  $\sim 3^\circ$  по углу  $\alpha$  (в плоскости, перпендикулярной плоскости пластин анализатора) и  $\sim 4^\circ$  по углу  $\beta$  (в плоскости пластин анализатора). Геометрический фактор анализаторов составляет  $\sim 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ ср}$  при площади входной апертуры  $0,12 \text{ см}^2$ .

Таблица 2.2: Основные технические характеристики датчиков приборов СКС-04, МОНИТОР и БИФРАМ.

Тип датчика	Период измерения,	Энергетич. диапазон,	Разрешение (ПШПВ)			
Прибор	с	кэВ	$\Delta E/E, \%$	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$M/\Delta M$
Простой ЭА СКС -04	246	0,23-4,6	7	3	4	–
Селектив. ЭА СКС -04	246	0,23-4,6	5	2	3	6
ЦФ, СКС-04	10,24	i: неогран. e: >0,1	–	40	40	–
Простой ЭА МОНИТОР	1,36	0,16-4,2	9	3	3	–
Простой ЭА БИФРАМ	0,64	0,16-4,2	9	3	3	–
ЭМА, ДФП-М БИФРАМ	$\alpha$ : 8 i: 788	0,7-7,6	4-20	1-2,5	10	15-35

Тип датчика	Площ. вх. ап., см <sup>2</sup>	Телес. угол, ср.	Геометр. фактор, см <sup>2</sup> ср.	Пропускание, %	Регистр. потоки, см <sup>-1</sup> с <sup>-1</sup>
Прибор					
Простой ЭА СКС -04	0,12	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	30	$\geq 2 \cdot 10^3$
Селектив. ЭА СКС -04	0,12	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	0,9	$\geq 10^5$
ЦФ, СКС-04	9,6	$6,3 \cdot 10^{-1}$	60	95	$10^7 - 10^{10}$ $10^7 - 10^9$
Простой ЭА МОНИТОР	0,03	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	60	$\geq 10^4$
Простой ЭА БИФРАМ	0,03	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	60	$\geq 10^4$
ЭМА, ДФП-М БИФРАМ	0,01 0.8	$(3 - 8) \cdot 10^{-3}$	$(3 - 8) \cdot 10^{-5}$ $(2 - 6) \cdot 10^{-3}$	90	$\geq 10^5$ $\geq 10^5$



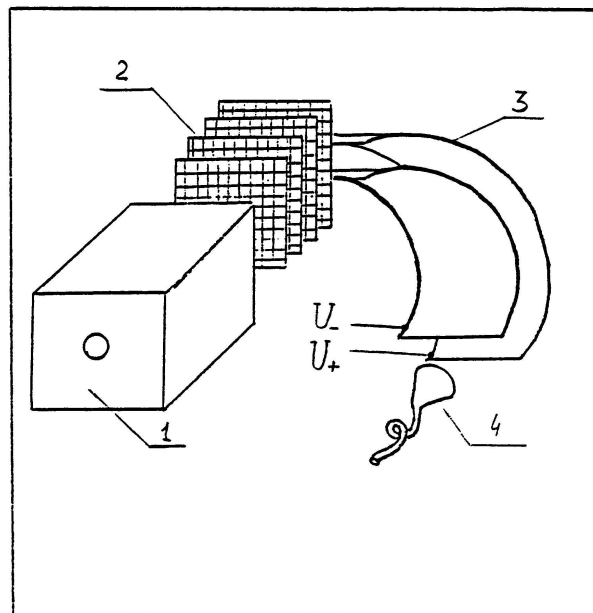


Рис. 2.1: Схематическое изображение электростатического анализатора: 1 - коллиматор; 2 - набор сеток; 3 - цилиндрический дефлектор; 4 - детектор (ВЭУ-6).

Эффективное пропускание составляет  $\sim 30\%$ , а абсолютная чувствительность по потоку - нижняя граница регистрации при нормальном падении потока в центре энергетического диапазона каждой ступени спектра -  $\sim 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Электростатические анализаторы спектрометра СКС-04 осуществляют измерение спектров ионов в диапазоне энергий на единицу заряда 0,23-4,6 кэВ. Каждый спектр измеряется по 24 ступеням, расставленным приблизительно равномерно в логарифмической энергетической шкале и переключаемым синхронно для всех датчиков с периодом 10,24 с.

Во всех датчиках в качестве детекторов используются каналные электронные умножители, работающие в режиме насыщения при постоянном уровне дискриминации сигналов. Измерения ведутся в режиме счета импульсов с выходов умножителей с помощью квазилогарифмического счетчика с емкостью  $\sim 10^6$  импульсов. Информация с каждого счетчика передается по двум аналоговым каналам - отдельно характеристика и мантисса числа, что обеспечивает точность передачи количества сосчитанных импульсов  $\sim 5\%$ .

Основные отличия простых электростатических анализаторов приборов МОНИТОР и БИФРАМ заключаются, во-первых, в некоторых различиях энергоугловых характеристик датчиков (см. Табл. 2.2), во-вторых, в режимах измерений (в приборе МОНИТОР спектр ионов из 32 ступеней в быстром режиме измерялся за 1,36 с, а в приборе ВУ комплекса БИФРАМ - за

0,64 с) и, в третьих, для проведения взаимной калибровки нескольких датчиков эти датчики были выполнены в виде двойных анализаторов, собирающих последовательно потоки ионов с двух направлений на один детектор [38, 37, 67, 76, 39, Застенкер и др., 1985; Застенкер и др., 1982; Avakov et al., 1985; Bedrikov et al., 1985; Застенкер и др., 1986].

## 2.2.2 Электростатические анализаторы с селекцией по массе ионов

Селективные измерения энергетических распределений протонной и  $\alpha$ -компонент солнечного ветра производились с помощью двух идентичных датчиков, состоящих из последовательно расположенных фильтра Вина [45, Климашов и Коваленко, 1974], цилиндрического электростатического анализатора и канального электронного умножителя типа ВЭУ-6 (см. Рис. 2.2).

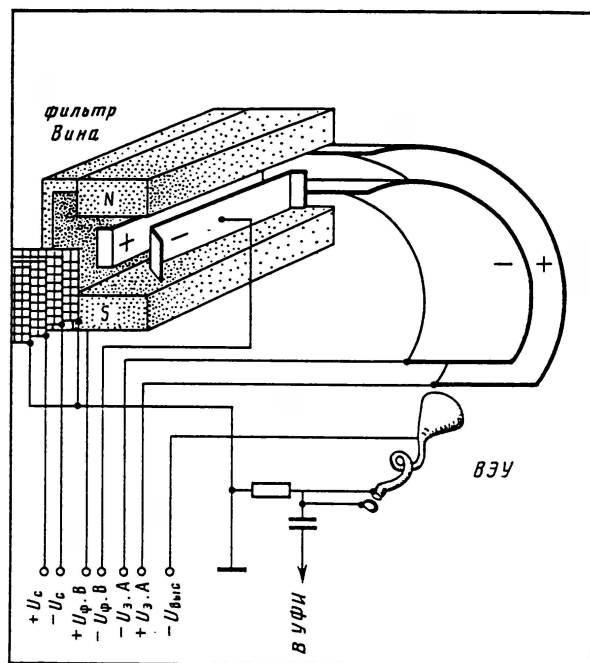


Рис. 2.2: Схематическое изображение селективного анализатора с фильтром Вина, цилиндрическим дефлектором и детектором.

Фильтр Вина со скрещенными магнитным и электрическим полями селекционирует частицы по скорости. Соответствующей настройкой электростатического анализатора и фильтра Вина выбираются ионы по отношению энергии к заряду  $E/q$  и по отношению массы к заряду  $M/q$ . Селекционирующие датчики также выполнены в виде типовых модулей, близких по конструкции к модулю для неселективных измерений ионных компонент. Каждый из двух селективных датчиков производит поочередные измерения спектров протонов и  $\alpha$ -частиц.

При регистрации протонов одним датчиком, другой - регистрирует  $\alpha$ -частицы и наоборот [8, Вайсберг и др., 1979].

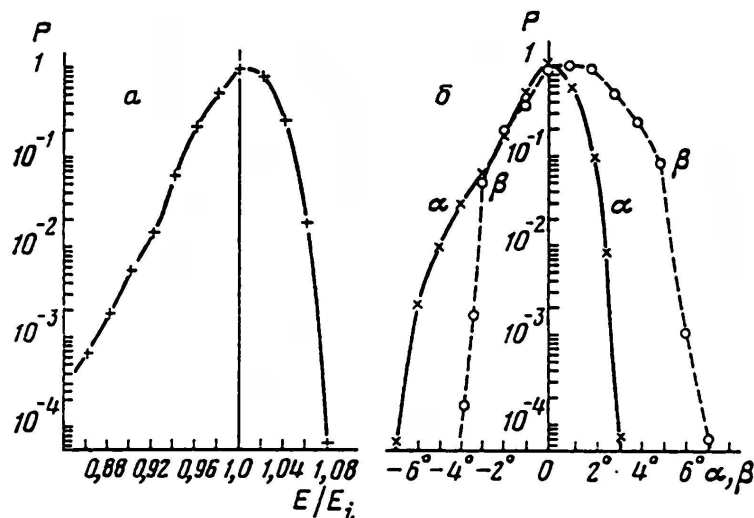


Рис. 2.3: Энергетическая (а) и угловые (б) характеристики селективного датчика прибора СКС-04, установленного на спутнике *Прогноз 7* [8, Вайсберг и др., 1979].

При наземной обработке особое внимание было уделено измерениям характеристик селективных датчиков, имеющих более сложную анализирующую систему, требующую настройки. На Рис. 2.3 даны энергетические и две угловые характеристики одного из селективных каналов - относительное пропускание канала  $P$  в зависимости от энергии  $E$ , нормированной к центральной энергии настройки  $E_i$  (Рис. 2.3а) и от углов  $\beta$  и  $\alpha$  - соответственно, в плоскости пластин анализатора и в перпендикулярной плоскости (Рис. 2.3б). Видно, что эти характеристики довольно узкие на уровне 50% от максимума, но значительно расширяются на уровне 1-0,1%, при этом угловая характеристика по углу  $\beta$  значительно шире, чем по углу  $\alpha$ . Энергетическая характеристика и угловая диаграмма по  $\alpha$  несимметричны - один склон круче другого. Полная ширина на полувысоте для энергетической характеристики составляет  $\sim 5\%$  (на уровне 1%  $\sim 16\%$ ), для угловой  $\sim 2^\circ$  по углу  $\alpha$  и  $\sim 3^\circ$  по углу  $\beta$  (на уровне 1% они возрастают, соответственно, до  $\sim 7^\circ$  и  $\sim 9^\circ$ ). Геометрический фактор селективных датчиков составляет  $\sim 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ ср}$  при площади входной апертуры  $0,12 \text{ см}^2$ . Эффективное пропускание составляет - 0,5 - 1%, а абсолютная чувствительность по потоку (нижняя граница регистрации)  $\sim 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Во время полета спутника *Прогноз 7* в одном из селективных каналов прибора СКС-04 заметно снизилась чувствительность, поэтому при дальнейшем анализе его данных использовались показания лишь одного селективного датчика.

Селективные анализаторы спектрометра СКС-04 осуществляют измерение

спектров ионов в диапазоне энергий на единицу заряда 0,23-4,6 кэВ, разделенном логарифмически равномерно на 24 ступени.

Степень разрешения по отношению массы к заряду для селективного датчика прибора СКС-04 можно охарактеризовать тем, что при настройке датчика на протоны, он пропускает не более  $(1-2) \cdot 10^{-3}$  от падающего потока  $\alpha$ -частиц, а при настройке на  $\alpha$ -частицы - не более  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$  от потока протонов, т.е. массовое разрешение на полувьсоте составило  $(M/q)/\Delta(M/q) \sim 6$ .

Прибор МОНИТОР включает в себя лишь простые электростатические анализаторы, а данные селективных анализаторов для измерения  $\alpha$ -частиц комплекса БИФРАМ в настоящей работе не использовались.

### 2.2.3 Датчики интегрального потока

Углы прихода и величина интегрального потока ионов всех энергий и электронов с энергией более 100 эВ определяются в приборе СКС-04 по токам трех идентичных интегральных цилиндров Фарадея, оси полей зрения которых отклонены от основного направления на угол  $20^\circ$  и отстоят друг от друга на  $120^\circ$  по азимутальному углу. Цилиндр Фарадея (см. Рис. 2.4) состоит из металлического корпуса цилиндрической формы (1) с входным отверстием, закрытым металлической сеткой (2), супрессорной сеткой (3), на которую подается запирающее напряжение -100 В, и коллектора (4), который соединен с усилителем тока. Ток заряженных частиц, попадающих на коллектор цилиндра Фарадея, измеряется с помощью усилителя постоянного тока, имеющего линейно-ломанную характеристику и обеспечивающего измерение токов двух полярностей.

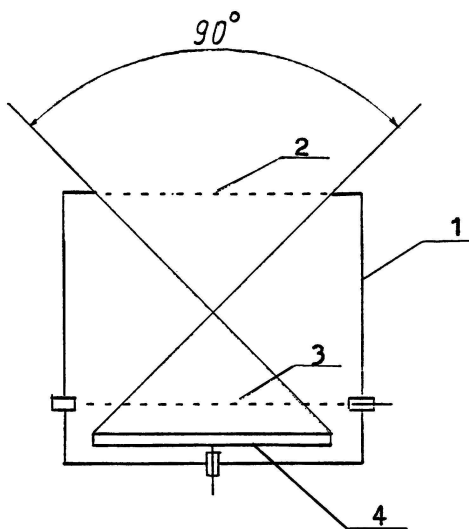


Рис. 2.4: Схематическое изображение цилиндра Фарадея.

Угловая диаграмма поля зрения цилиндра Фарадея представляет собой конус с полным раствором  $90^\circ$  и шириной на полувывсоте -  $40^\circ$ . На Рис. 2.5а и 2.5б показаны в полярной системе координат угловые характеристики, соответственно, одного из трех цилиндров Фарадея и суммарная для трех датчиков. Геометрический фактор цилиндра Фарадея составляет  $6.0 \text{ см}^2 \text{ ср}$  при площади входной апертуры  $9.6 \text{ см}^2$ . Как видно на Рис. 2.5б, суммарная угловая характеристика трех датчиков оказывается достаточно широкой, поэтому датчики интегрального потока прибора СКС-04 полностью регистрируют поток ионов солнечного ветра, а соотношение между токами отдельных цилиндров Фарадея позволяет определить направление его прихода [36, Застенкер и др., 1981]. Каждый цилиндр Фарадея обеспечивает измерение потоков ионов в диапазоне  $10^7$ - $10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и электронов в диапазоне  $10^7$ - $10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

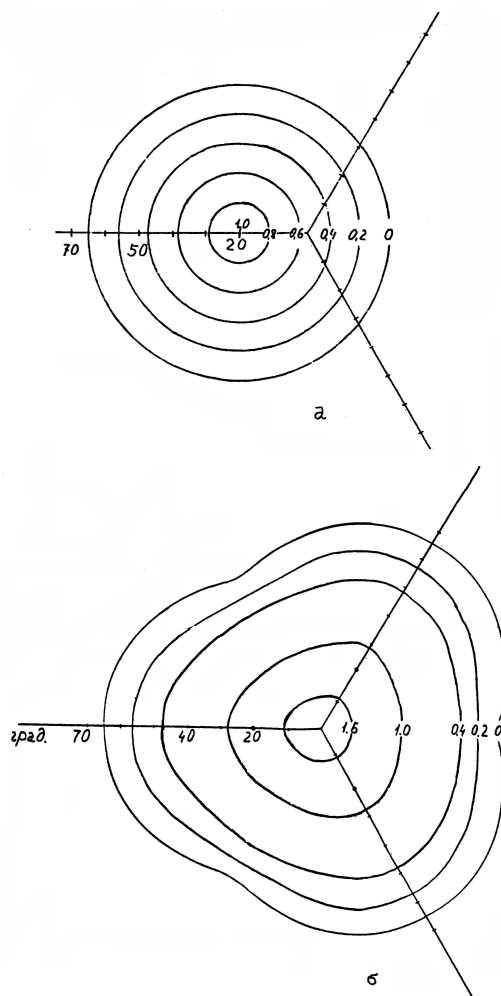


Рис. 2.5: Угловые характеристики а) одного и б) трех цилиндров Фарадея прибора СКС-04 в полярной системе координат, в которой за начало отсчета выбрана ось прибора, ориентированная вдоль оси вращения спутника *Прогноз 7* [23, Ермолаев, 1988].

В конструкции всех трех типов датчиков были приняты специальные меры для уменьшения влияния ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца на результат измерения потоков частиц. Это, прежде всего, чернение (для поглощения фотонов) и рифление (для рассеяния фотонов) металлических частей конструкции, на которые может попадать прямой или отраженный свет. Кроме того, над коллекторами цилиндров Фарадея были расположены супрессорные сетки с отрицательным потенциалом -100 В для возвращения на коллектор фотоэлектронов, выбитых с поверхности коллектора фотонами. Принятые меры привели к тому, что в простом электростатическом анализаторе "световая" скорость счета (при наиболее неблагоприятной ориентации оси зрения датчика относительно направления на Солнце) составила 5-7 имп./с, а в селективном анализаторе свет вообще не оказывал влияния на работу датчиков, при этом уровень фона в обоих датчиках составил 0,5-1 имп./с. Влияние УФ-излучения на показания цилиндра Фарадея оказалось более заметным: величина фототока, связанного в основном с потоком фотоэлектронов с супрессорной сетки на коллектор, была сравнимой с величиной тока, связанного с потоками заряженных частиц. Однако, благодаря правильно разработанной конструкции датчика, фототок не зависел от ориентации оси зрения датчика относительно направления на Солнце и был очень стабилен. Оценки величины фототока в тех областях магнитосферы, где отсутствуют потоки заряженных частиц более  $10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , показали, что за время оборота спутника вокруг Земли (4 суток) фототок изменялся не более чем на 10%. Таким образом, интерполируя значения фототока между двумя последовательными его измерениями в магнитосфере, можно оценить потоки заряженных частиц в солнечном ветре по результатам измерений тока цилиндра Фарадея с неопределенностью не более 20%.

Прибор МОНИТОР и комплекс БИФРАМ включали в себя по одному цилиндру Фарадея с более широкой угловой диаграммой (см. Табл. 2.2). В диапазоне углов падения  $\pm 20^\circ$  угловая диаграмма этих датчиков почти не зависит от угла, а при увеличении угла падения от  $20^\circ$  до  $54^\circ$  спадает почти линейно до нуля. Для измерения углов падения потока коллектора цилиндров Фарадея были разделены на три 120-градусных сегмента с независимыми усилителями тока [38, 37, 67, 76, Застенкер и др., 1985; Застенкер и др., 1982; Avakov et al., 1985; Bedrikov et al., 1985].

## 2.2.4 Энерго-масс-анализатор ионов

Измерения ионного состава солнечного ветра на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* (проект "Интершок") выполнялись с помощью энерго-масс-анализатора прибора ДФП-М, входящего в состав комплекса БИФРАМ. Энерго-масс-анализатор выполнен по оригинальной измерительной схеме [17, Гартманов и др., 1983], которая включает (см. Рис. 2.6) ускоряющий промежуток, коллиматор, цилиндрический энергоанализатор (с секторным

углом  $127^\circ$ ) и масс-спектрометр, состоящий из магнита и цилиндрического электростатического анализатора (с секторным углом  $63^\circ$ ). В качестве детектора используется шевронная сборка микроканальных пластин. За счет коллинеарности обкладок обоих электростатических анализаторов и плоскости зазора постоянного магнита в такой системе нет принципиальных ограничений на размер входной апертуры в одном направлении, при этом размер в перпендикулярном направлении ограничивается условием необходимой разрешающей способности. Это позволяет при одинаковых габаритах с известными схемами энерго-масс-анализатора на порядок увеличить площадь входной апертуры и, следовательно, чувствительность прибора.

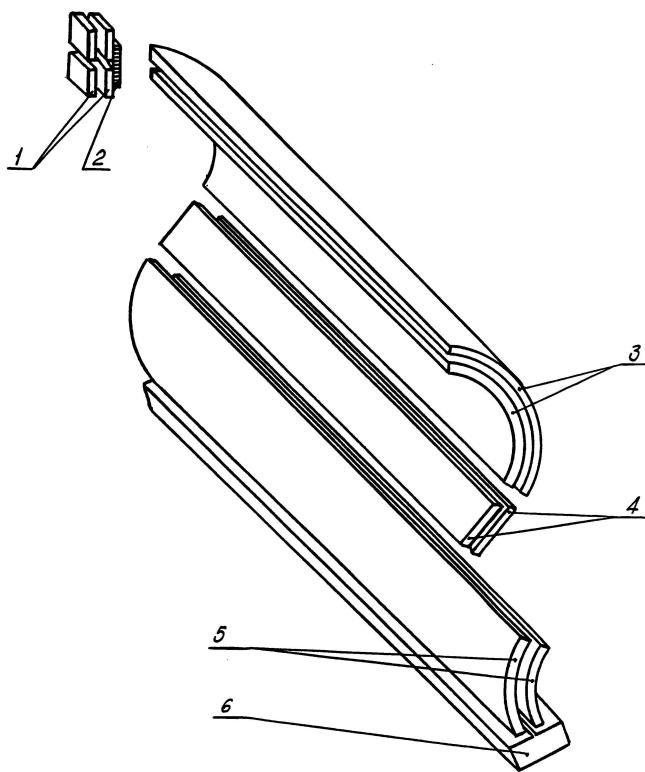


Рис. 2.6: Схематическое изображение энерго-масс-анализатора ДФП-М на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* (проект "Интершок") [31, Ермолаев и др., 1986]: 1 - ускоряющий промежуток, 2 - коллиматор, 3 - цилиндрический 127-градусный дефлектор, 4 - постоянный магнит, 5 - цилиндрический 63-градусный дефлектор, 6 - детектор (МКП).

Принцип действия энерго-масс-анализатора заключается в следующем. Первоначально поток ионов проходит энергоанализ в системе из ускоряющего промежутка и электростатического анализатора путем изменения напряжения на ускоряющем промежутке при фиксированном напряжении на пластинах электростатического анализатора. Энергетический диапазон  $E/q$  от 0,7 до 7,6 кэВ разделен на 46 одинаковых ступеней по 150 В. В систему масс-анализатора

ионы попадают с энергией, приблизительно равной  $E_0 = 7,6 \text{ кэВ}/q$ , при этом разброс по углам определяется в основном входным коллиматором и не превышает  $\pm 1^\circ$ . В однородном магнитном поле направление движения ионов изменяется на угол  $\mu$ , пропорциональный  $(M/q)^{-1/2}$ , поэтому на вход второго электростатического анализатора ионы поступают под углом  $\mu$  относительно нормали к плоскости входа и селективируются по величине  $E_0 \cos^2 \mu$ . Так как эта величина однозначно связана со значением  $M/q$  анализируемого иона, то второй энергоанализатор в данном случае выполняет функцию селектора по массе на единицу заряда. Настройка на регистрацию определенного сорта ионов производится путем подачи на пластины второго электростатического анализатора соответствующей разности потенциалов [17, 47, 18, 31, Гартманов и др., 1983; Кочаров и др., 1984; Гартманов и др., 1985; Ермолаев и др., 1986].

С целью сокращения длительности цикла работы энерго-масс-анализатора было предусмотрено измерение только на 11-ти фиксированных значениях  $M/q$ : 2,0; 2,29; 2,67; 3,50; 4,0; 4,67; 5,1; 5,6; 6,2; 7,0; 8,0. С этой же целью при фиксированной настройке по  $M/q$  анализ по  $E/q$  ионного потока производится не во всем диапазоне энергий, а лишь по 7-ми ступеням, при этом предполагалось, что все ионные компоненты имеют приблизительно равные массовые скорости. В качестве опорного сорта ионов были выбраны  $\alpha$ -частицы, как наиболее обильные из исследуемых тяжелых ионов. Определив положение в шкале  $E/q$  пика  $\alpha$ -частиц, можно рассчитать положение максимумов распределений по  $E/q$  для всех остальных ионов.

Для  $\alpha$ -частиц время экспозиции было выбрано равным 0,125 с, что позволяет производить цикл "поиска максимума" для ионов с  $M/q = 2$  во всем энергетическом диапазоне за время  $\sim 10,24$  с. Для остальных ионов время экспозиции составляет  $\sim 8$  с, при этом энергоанализ производится по 7-ми ступеням таким образом, что расчетное положение пика распределения ионов данного сорта соответствовало 4-й ступени. В результате использования такой адаптивной циклограммы работы прибора максимальная длительность цикла измерений не превышает 13 мин. Последовательность измерений спектров различных видов ионов осуществляется в порядке возрастания значений  $M/q$  и  $E/q$ , что позволяет прервать цикл измерений при достижении верхней границы энергетического диапазона прибора, поэтому при увеличении скорости течения солнечного ветра длительность цикла измерений ионного состава уменьшается и при средних скоростях солнечного ветра (450-500 км/с) она составляет  $\sim 8 - 10$  мин.

На спутниках *Прогноз 7*, *8* датчики прибора СКС-4 были установлены так, что оси апертур центрального неселективного ионного датчика и двух селективирующих датчиков были ориентированы вдоль продольной оси спутника, а оси полей зрения цилиндра Фарадея отклонены от продольной оси на угол  $20^\circ$ . Переключение энергетических ступеней и опрос показаний всех датчиков производились с периодом 10,24 с. Таким образом время измерения одного спектра составляло  $24 \times 10,24 \text{ с} \approx 4,1 \text{ мин.}$ , а потока - 10,24 с.



Оси зрения одного электростатического анализатора и цилиндра Фарадея прибора МОНИТОР ориентированы вдоль оси вращения спутника *Прогноз 8*, направленной на Солнце, а ось второго электростатического анализатора отвернута от этого направления на угол  $7^\circ$ . В медленном режиме энергетический спектр ионов измерялся за время  $32 \times 10,24 \text{ с} \approx 5,5 \text{ мин.}$  и поток - за  $10,24 \text{ с}$ , а в быстром режиме - за  $1,36 \text{ с}$  и  $0,02 \text{ с}$ , соответственно.

Оси зрения цилиндра Фарадея и энерго-масс-анализатора комплекса БИФ-РАМ ориентированы вдоль оси вращения спутника *Прогноз-10-Интеркосмос*, направленной на Солнце, а оси электростатического анализатора ионов прибора ВU отвернуты от этого направления на углы от  $7^\circ$  до  $22^\circ$ . В медленном режиме энергетический спектр прибора ВU измерялся также, как и в приборе МОНИТОР, за  $\sim 5,5 \text{ мин.}$ , поток - за  $10,24 \text{ с}$  и массовый спектр энерго-масс-анализатора - за  $\sim 10 \text{ мин.}$  (энерго-масс-анализатор работает только в медленном режиме), а в быстром режиме за  $0,64 \text{ с}$  и  $0,02 \text{ с}$ , соответственно.

## 2.3 Методика обработки данных

На предварительном этапе обработки исходная информация очищалась от сбоев и по совокупности измеренных параметров селектировалась по временным интервалам, относящимся к определенным областям пространства: солнечный ветер, переходная область, магнитосфера. Дальнейшая физическая обработка данных проводилась в 3 этапа. На первом этапе по результатам измерения определялись гидродинамические параметры (массовые скорости, кинетические температуры и концентрации) протонов и  $\alpha$ -частиц для всех областей пространства, пересекаемых спутником. На втором этапе все полученные данные отбирались по величине (отбрасывались физически недостоверные значения) и по времени пребывания спутника в солнечном ветре, а также в случае необходимости объединялись с одновременными измерениями магнитного поля, проведенными с помощью магнитометров СГ-70 и СГ-76 [15, 234, Гаврилова и др., 1986; Styazhkin et al., 1985]. На последнем этапе определялись химический и зарядовый составы ионной компоненты солнечного ветра, а также проводилась статистическая обработка данных. Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных этапов обработки данных.

### 2.3.1 Методика определения гидродинамических параметров ионных компонент солнечного ветра

Наиболее полная информация о каждой компоненте космической плазмы может быть получена путем подробного измерения трехмерной функции распределения частиц по скоростям (см. обзор [14, Веселовский, 1984]). Однако такие измерения требуют создания достаточно сложной аппаратуры. С другой стороны, для решения ряда задач (в том числе для изучения крупномасштабной

динамики компонент солнечного ветра) можно ограничиться определением лишь некоторых статистических характеристик функций распределений ионов (гидродинамических параметров), таких как массовая (переносная) скорость, кинетическая температура и концентрация. Определение этих параметров требует существенно меньшего объема измерений, чем для трехмерной функции распределения, и поэтому может быть проведено с помощью более простой аппаратуры, и при той же скорости записи информации - с более высоким временным разрешением.

Остановимся на физических принципах обработки данных, полученных с помощью селективного анализатора и цилиндра Фарадея прибора СКС-04 и относящихся к солнечному ветру.

В общем случае отклик прибора на входящий поток частиц может быть представлен в виде формулы [20, Гурин и др., 1975]:

$$y = An \int \int \int v f F d^3v, \quad (2.1)$$

где  $A$  - нормировочная константа,  $n$  - концентрация,  $v$  - скорость,  $f$  - функция распределения частиц по скоростям, зависящая в общем случае от величины и направления переносной скорости ветра, температуры частиц, анизотропии этой температуры и т.д.,  $F$  - характеристика прибора. Интегрирование (2.1) ведется в трехмерном пространстве скоростей.

В случае регистрации заряженных частиц одного сорта  $l$  с помощью цилиндра Фарадея коллекторный ток определяется выражением:

$$I_l = qn \int \int \int v f_l F d^3v, \quad (2.2)$$

где  $q$  - заряд частиц.

При измерении потока с помощью одного цилиндра Фарадея прибора СКС-04 суммарный коллекторный ток  $I_s$  может быть выражен через три составляющие:

$$I_s = I_i + I_e + I_\Phi, \quad (2.3)$$

где  $I_i$  и  $I_e$  - соответственно ионный и электронный токи, определенные по формуле (2.2),  $I_\Phi$  - остаточный ток электронов, вызванный УФ-излучением Солнца (фототок).

Величина фототока оценивается по регистрируемому каждым цилиндром Фарадея току во время движения спутника в тех областях магнитосферы, где отсутствуют потоки заряженных частиц более  $10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Так как при изготовлении датчика были приняты специальные меры, чтобы уменьшить величину фототока и ее зависимость от ориентации датчика, оказалось, что величина фототока практически не изменяется на временных масштабах порядка нескольких суток и составляет  $\sim 10^{-9}$  А, или  $\sim 20\%$  от величины  $I_i$ . Поэтому величина фототока  $I_\Phi$ , оцененная в магнитосфере, использовалась и при обработке данных, полученных в солнечном ветре.

При проведении измерения в солнечном ветре вклад тока электронов  $I_e$  мал по сравнению с током ионов  $I_i$  и фототоком  $I_\Phi$ . Во-первых, функция распределения электронов в солнечном ветре изотропна, так как тепловая скорость электронов почти на порядок больше их переносной скорости. С учетом того, что угловая функция пропускания цилиндра Фарадея прибора СКС-04 меняется линейно от 1 при угле падения потока  $0^\circ$  до нуля при угле падения  $45^\circ$  (см. Рис. 2.5а), датчик собирает следующую долю полного потока частиц, имеющих изотропное распределение:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{2\pi \int_0^{\pi/4} \sin(\pi/4 - x) dx}{2\pi \int_0^{\pi} \sin(x) dx} \leq 5 \cdot 10^{-2}. \quad (2.4)$$

Во-вторых, цилиндр Фарадея регистрирует лишь электроны, обладающие энергией, превышающей потенциал супрессорной сетки (100 В). При средней температуре электронов в солнечном ветре  $\sim 20$  эВ [144, Hundhausen, 1972] доля электронов, имеющих максвелловское распределение и преодолевших потенциал 100 эВ, составляет:

$$\xi = 1 - \frac{\int_0^{\sqrt{5}} \exp(-x^2/2) dx}{\int_0^{\infty} \exp(-x^2/2) dx} \leq 2.6 \cdot 10^{-2}. \quad (2.5)$$

Таким образом отношение потоков электронов и ионов солнечного ветра на коллектор цилиндра Фарадея прибора СКС-04 составляет:

$$\frac{I_e}{I_i} = \frac{n_e v_{Te}}{n_i v_p} \xi \frac{P}{P_0} \leq 8 \cdot 10^{-3}, \quad (2.6)$$

где  $n_e = n_i = n_p$  - соответственно, концентрации электронов и протонов,  $v_{Te}$  - тепловая скорость электронов,  $v_p$  - массовая скорость протонов. Из (2.6) следует, что в солнечном ветре током электронов  $I_e$  можно пренебречь по сравнению с током ионов  $I_i$ .

Как следует из Рис. 2.5б, суммарная угловая характеристика трех цилиндров Фарадея в пределах  $20^\circ$  от оси прибора меняется не более чем на  $\sim 20\%$  от значения в максимуме, и почти не зависит от азимутального угла. Так как переносная скорость ионов в солнечном ветре более, чем на порядок, превышает их тепловую скорость, и направление прихода ионов не отличается более чем на  $15\%$  от радиального направления [144, Hundhausen, 1972], то в области значащих величин функции распределения  $f_i$  приборную функцию  $F$  в формуле (2.2) можно считать постоянной. По определению поток частиц определяется:

$$P = n \int \int \int v f(v) d^3v = n v_p, \quad (2.7)$$

Ионная компонента солнечного ветра на 95% состоит из однозарядных ионов, поэтому с учетом (2.3), (2.6) и (2.7) интегральный поток ионов можно определить по измеренным токам:

$$P = nv_p = \frac{A}{q} \sum_{j=1}^3 (I_j - I_{\Phi j}), \quad (2.8)$$

где  $I_j$  и  $I_{\Phi j}$  - измеренный  $j$ -ым цилиндром Фарадея ток и его фототок, соответственно,  $A$  - коэффициент, учитывающий суммарный геометрический фактор трех датчиков. Формула (2.8) показывает, что при известной скорости солнечного ветра  $v_p$  может быть определена концентрация ионов  $n$ .

В силу вышеизложенного, неопределенность при вычислении величины потока  $\Delta P/P$  и концентрации  $\Delta n/n$  ионов солнечного ветра по результатам измерения цилиндра Фарадея прибора СКС-04 определяется главным образом неточностью оценок величин фототока и составляет не более 20% (о точности определения скорости будет сказано ниже).

Для определения углов падения потока  $\gamma$  и  $\varphi$  на прибор проводится сравнение измеренных значений токов цилиндра Фарадея  $I_j$  с функцией отклика  $J_j$ , рассчитанной с учетом угловой характеристики датчика и в предположении о конвектируемом максвелловском распределении ионов. В анализе используются результаты, полученные с помощью методики, немного отличающейся от описанной в работе [36, Застенкер и др., 1981]. Во-первых, для учета тепловой ширины потока при определении углов прихода эталонные таблицы отклика были рассчитаны для разных значений отношений тепловой энергии к переносной ( $kT/(mv^2/2)$ ). В качестве меры угловой ширины потока ионов сорта  $i$  удобно взять параметр  $\kappa_i = T_i/v_i^2$ , где  $T_i$  измеряется в  $K$  и  $v_i$  - км/с, так как он для протонов  $\kappa_p \leq 1$  в солнечном ветре ( $v_p \geq 300$  км/с и  $T_p \leq 3 \cdot 10^5 K$ ) и  $\kappa > 1$  в переходной области магнитосферы Земли ( $v_p \leq 300$  км/с и  $T_p > 5 \cdot 10^5 K$ ).

Таким образом функция откликов, представляющая зависимость отношения тока коллектора при падении потока на цилиндр Фарадея под углом  $\delta$  (относительно нормали к входной апертуре датчика) к току коллектора при нормальном падении потока  $J/J_0$ , рассчитывается как функция угла  $\delta$  и параметра  $\kappa$ :  $J/J_0 = f_{FC}(\delta, \kappa)$ .

Во-вторых, для повышения точности и скорости вычислений была использована другая процедура минимизации функционала. Углы  $\delta_j$  трех датчиков связаны с искомыми углами  $\gamma$  и  $\varphi$  следующими соотношениями:

$$\delta_j = \arccos(\cos\mu \cos\gamma + \sin\mu \sin\gamma \cos(\varphi + 120^\circ(j-1))), \quad (2.9)$$

где  $j = 1, 2, 3$  - номера датчиков, угол  $\gamma$  - угол между главной осью прибора СКС-04 и потоком, угол  $\varphi$  - соответствующий азимутальный угол,  $\mu = 20^\circ$  - угол между осями датчиков и главной осью прибора. Для определения углов  $\gamma$  и  $\varphi$  минимизируется функционал:

$$S = \{(I_1/I_2)/[(J_1/J_0)/(J_2/J_0)] - 1\}^2 + \{(I_3/I_2)/[(J_3/J_0)/(J_2/J_0)] - 1\}^2. \quad (2.10)$$

Минимизация осуществляется методом покоординатного спуска с поиском экстремума по каждой координате по методу Фибоначчи [44, Карманов, 1975], при этом рассчитанная функция  $f_{FC}(\delta, \kappa)$  задается таблично с линейной интерполяцией в двумерном пространстве.

На Рис. 2.7 показана рассчитанная функция отклика  $J/J_0 = f_{FC}(\delta, \kappa)$  для нескольких значений  $\kappa$ . Как видно из рисунка, при обработке данных, полученных в солнечном ветре, где  $\kappa \leq 1$ , можно без заметной потери точности пользоваться функцией  $f_{FC}(\delta, \kappa) = f_{FC}(\delta, 0)$ , которая соответствует угловой характеристике датчика. Погрешности определения углов падения потоков ионов, возникающие из-за конечной точности измеряемых величин и используемого метода вычислений в диапазоне  $\gamma = 3 - 15^\circ$ , составляют  $\Delta\gamma \leq (0.5 - 1)^\circ$  и  $\Delta\varphi \leq (5 - 10)^\circ$ , в диапазонах  $\gamma < 3^\circ$  и  $\varphi = 15 - 23^\circ$  неопределенность обоих углов возрастает приблизительно вдвое, а при  $\gamma > 23^\circ$  поток солнечного ветра не попадает на один из датчиков и определение углов становится невозможным [36, Застенкер и др., 1981].

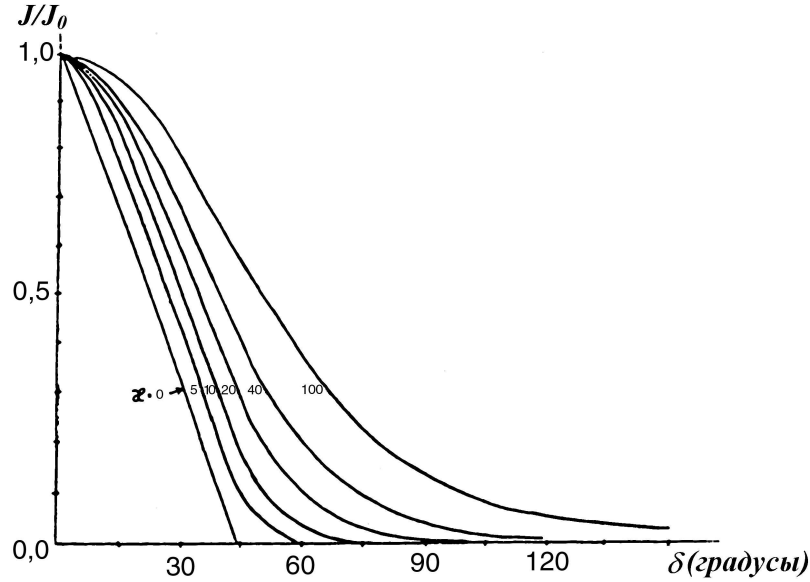


Рис. 2.7: Функция отклика цилиндра Фарадея прибора СКС-04 [23, Ермолаев, 1988] для различных значений тепловой ширины потока ионов  $\kappa = T[K]/v^2[\text{км/с}]$  и углов падения потока  $\delta$ .

Массовые скорости, кинетические температуры и относительное содержание  $\alpha$ -частиц и протонов определялись по данным селективного анализатора прибора СКС-04. Аналогично (2.1) отклик анализатора выражается формулой:

$$y_{kj} = An \iiint v f F_{kj} d^3v, \quad (2.11)$$

где индекс  $j$  соответствует номеру датчика, а  $k$  - номеру энергетической ступени.

Определение гидродинамических параметров потока каждой ионной компоненты основывается на фундаментальном предположении об изотропном максвелловском распределении частиц по скоростям, при этом искомые параметры являются коэффициентами в этом распределении. В системе отсчета, движущейся вместе с потоком, распределение имеет вид [241, Wolfe et al., 1966]:

$$f \sim \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} V^2 \exp\left(-\frac{mV^2}{2kT}\right), \quad (2.12)$$

где  $m$  - масса частицы,  $V$  - скорость частицы,  $T$  - кинетическая температура потока,  $k$  - постоянная Больцмана. При переходе к системе координат, связанной со спутником, необходимо учесть величину и направление переносной скорости солнечного ветра  $v$ . Для анализатора с высоким энергетическим разрешением ( $\Delta E \ll E$ ) и с малым угловым фактором ( $\alpha, \beta \ll 2kT/mv^2$ ) отсчет на  $k$ -ой энергетической ступени из интегрального вида (2.12) может быть преобразован к алгебраическому виду [50, Омельченко, 1987]:

$$y_k(E_k) = C E_k \left(\frac{kT}{m}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{(\sqrt{E_k} - \sqrt{E_0})^2}{kT}\right), \quad (2.13)$$

где  $E_0 = mv^2/2$  - энергия, соответствующая переносной скорости потока. Путем минимизации функционала

$$S = \sum_{k=1}^N (y_k - Y_k)^2, \quad (2.14)$$

где  $N$  - число значащих точек в энергетическом спектре, а  $y_k$  и  $Y_k$  - измеренные и рассчитанные по формуле (2.13) величины откликов, определяют параметры распределения  $C, E_0$  (или  $v$ ) и  $T$ . Алгоритмы и комплексы программ определения гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц по результатам измерений прибора СКС-04 подробно изложены в работе [6, 50, Братищенко и др., 1984; Омельченко, 1987].

Для надежного определения гидродинамических параметров ионной компоненты необходимо, чтобы пик энергетического распределения ионов находился внутри энергетического диапазона прибора. Чтобы найти положение максимума распределения на энергетической шкале как функцию параметров распределения, заменим в выражении (2.13) дискретные  $E_k$  на непрерывное  $E$  и приравняем производную  $dy(E)/dE = 0$ . Получится уравнение, связывающее энергию, на которой регистрируется максимальный отсчет,  $E_{max}$  с энергией переносного движения  $E_0$  и температурой  $T$ . Из этого уравнения с учетом того, что в солнечном ветре  $kT \ll E_0$ , а анализатор измеряет спектр в шкале энергии на единицу заряда, получается

$$E_{max}/q \approx E_0/q + 4kT. \quad (2.15)$$

Таким образом максимум распределения на энергетическом спектре оказывается смещенным в сторону больших энергий относительно переносной энергии на

величину порядка четырех температур. Это означает, что при измерениях энергетических спектров определенного сорта ионов вблизи верхней границы диапазона измерений прибора будет происходить своеобразная "измерительная селекция": спектры с максимумом будут регистрироваться лишь или для "холодной" (низкая  $T$ ), или "медленной" (низкая  $E_0/q$ ) ионной составляющей солнечного ветра [21, Ермолаев, 1986].

Учитывая этот эффект, а также то, что для надежного определения кинетической температуры необходимо хотя бы по одному измерению с обеих сторон от максимума энергетического распределения ионной компоненты, могут быть определены диапазоны надежного измерения массовых скоростей протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра. В солнечном ветре, где температуры не превышают 100 эВ для протонов и 400 эВ для  $\alpha$ -частиц [144, Hundhausen, 1972], для селективного анализатора прибора СКС-04, у которого энергетическая шкала для обеих компонент составляет 0.23-4.6 кэВ и расстояние между энергетическими ступенями - 14%, диапазон измеряемых массовых скоростей  $230 \leq v_p \leq 900$  км/с для протонов и  $170 \leq v_\alpha \leq 620$  км/с для  $\alpha$ -частиц. Эти ограничения учитывались на втором этапе при анализе результатов обработки данных, так как формально определенные гидродинамические параметры могут выходить за указанные пределы.

При выполнении предположения о максвелловском распределении ионов по скоростям основными источниками неопределенности в определении скорости  $v$ , температуры  $T$  и "концентрации"  $C$  ионных составляющих в используемом методе являются: (1) одномерность измерения энергетического распределения в условиях, когда угол отклонения оси датчика от направления потока ионов не известен, а реальные трехмерные распределения, во-первых, могут быть анизотропными (т.е. обладать двумя различными температурами вдоль и поперек магнитного поля [241, Wolfe et al., 1966]) и, во-вторых, могут иметь максимум распределений для разных ионных компонент на различных углах прихода; (2) приближенный учет угловых и энергетических характеристик датчика. Для характеристик селективного анализатора прибора СКС-04 и для типичных параметров солнечного ветра отклонение оси анализатора от направления потока приводит к возможной ошибке в определении гидродинамических параметров каждого сорта ионов для скорости  $\Delta v/v < 2-3\%$  и для температуры  $\Delta T/T < 20-25\%$  [21, Ермолаев, 1986]. Определение абсолютной концентрации ионов с помощью датчика, имеющего узкую угловую диаграмму и неизвестный угол отклонения от направления потока, невозможно, в то время как относительная концентрация  $n_\alpha/n_p$  при определенных условиях может быть определена.

Точность определения относительного содержания  $\alpha$ -частиц с помощью узконаправленного датчика, помимо характеристик датчика, зависит от характеристик течения: углов падения потоков на датчик  $\gamma_p$  и  $\gamma_\alpha$ , тепловой ширины потока  $T_p/E_p$  ( $E_p$  - кинетическая энергия переносного движения протонов) и отношения тепловых ширин потоков  $\alpha$ -частиц и протонов, которое

можно выразить через отношение температур  $T_\alpha/T_p$ . В частности, с помощью модельных расчетов было показано, что при характеристиках датчика, близких к характеристикам селективного анализатора прибора СКС-04 (разрешение по энергии  $\sim 6\%$  и по углу  $\sim 5^\circ$ ), и распределениях параметров  $\gamma_0$  (предполагалось, что  $\gamma_0 = \gamma_p = \gamma_\alpha$ ),  $T_p/E_p$  и  $T_\alpha/T_p$ , которые реально наблюдались в солнечном ветре, ошибка в определении  $n_\alpha/n_p$ , как правило, меньше  $\sim 60\%$ , при этом обращалось внимание, что ошибка в сторону завышения содержания  $\alpha$ -частиц более вероятна, чем в сторону занижения, и поэтому среднее значение определенного относительного содержания  $\alpha$ -частиц оказывается завышенным на 20-25% [54, Романов, 1975]. Если предположить, что углы прихода потоков  $\alpha$ -частиц и протонов мало отличаются (по имеющимся оценкам, разность между ними не превышает  $2 - 3^\circ$  [21, Ермолаев, 1986]), для средних параметров солнечного ветра оценка относительного содержания  $\alpha$ -частиц может отличаться от истинной на коэффициент  $\sim 2-3$  в зависимости от соотношения между углами  $\gamma_p$  и  $\gamma_\alpha$ . Однако при близких распределениях  $\gamma_p$  и  $\gamma_\alpha$  (т.е. когда близки средние значения и дисперсии этих углов) и достаточно большой статистике случаев (более 100) могут быть получены репрезентативные оценки средней относительной концентрации  $\alpha$ -частиц с точностью  $\sim 30\%$ .

### 2.3.2 Методика определения параметров тяжелых ионов солнечного ветра

Определение величины потоков ионов солнечного ветра более тяжелых, чем  $\alpha$ -частицы, в основном проводилось по данным простого электростатического анализатора прибора СКС-04, ориентированного на Солнце. На Рис. 2.8 приведен пример энергетического спектра ионов, измеренного 11 декабря 1978 г. с 01.59 по 02.03 UT этим анализатором. В спектре по энергии на единицу заряда прежде всего выделяются протонный ( $E/q = 0.6$  кэВ) и  $\alpha$ -пик ( $E/q = 1.2$  кэВ). Вследствие высокой чувствительности датчика вершина протонного пика на спектре находится в "зашкале", а узкий пик  $\alpha$ -частиц в данном случае не выходит за пределы динамического диапазона измерительного канала. Далее в этом спектре видны отдельные пики при значениях  $E/q$ , превышающих энергию протонов на заряд более чем в 2 раза, при этом величина отсчетов в этих пиках значительно превышает уровень фона. Сопоставление этого спектра со спектрами протонов и  $\alpha$ -частиц, одновременно измеренными селективными анализаторами прибора СКС-04, показывает, что пики в высокоэнергичной части спектра не являются вторичными пиками протонов или  $\alpha$ -частиц и могут быть обусловлены некоторыми другими ионами. В предположении, что все ионы имеют близкие переносные скорости и их химический состав не сильно отличается от химического состава солнечной атмосферы, эти ионы могут быть идентифицированы, как ионы кислорода, кремния и железа в соответствующих ионизационных состояниях [69, 73, Vame et al., 1968; Vame et al., 1975].



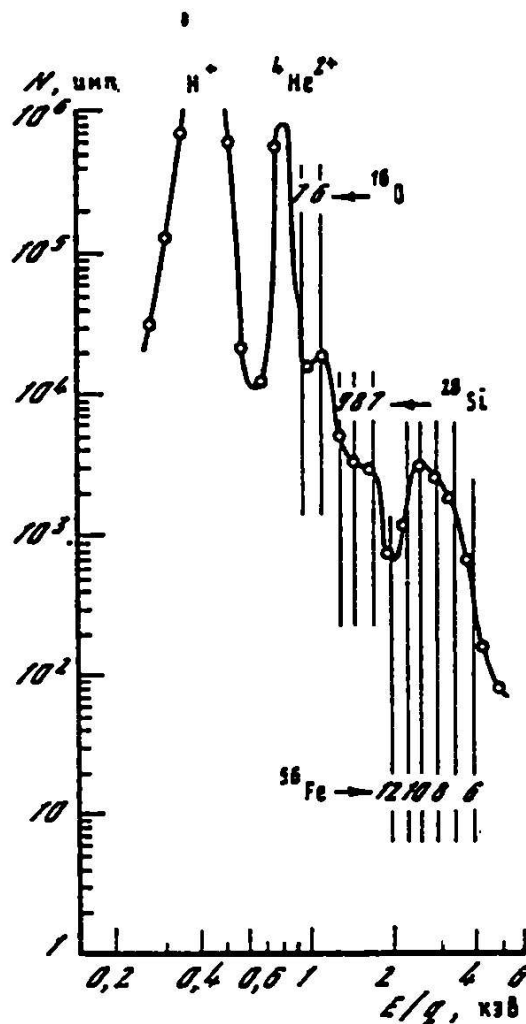


Рис. 2.8: Пример спектра по энергии на заряд, измеренного 11 декабря 1978 г. на спутнике *Прогноз 7* [9, Вайсберг и др., 1980]. Цифры на вертикальных линиях показывают степень ионизации соответствующего химического элемента, кружки - экспериментальные значения.

Изменение углов падения потока ионов на входную апертуру анализатора (в том числе и за счет вращения спутника) и различие в ширине угловых характеристик анализатора в двух взаимно перпендикулярных плоскостях приводит к изменению величины отсчета на энергетическом спектре ионов. Поэтому для учета влияния этих эффектов при обработке была использована следующая процедура. По соотношениям трех токов цилиндров Фарадея, измеренных в момент времени, ближайший к интервалу измерения потока ионов на заданной энергетической ступени анализатора, определяются углы падения потока ионов на входную апертуру датчика. С учетом полученных углов падения и двумерной угловой характеристики анализатора по величине зарегистрированного потока определяется величина потока ионов в направлении вектора потока на данной энергетической ступени. Таким же

образом определяются величины потоков ионов в направлении вектора потока на всех энергетических ступенях спектра, и по такому "восстановленному" спектру определяются параметры тяжелых ионов.

При использовании этой процедуры делаются следующие физические предположения. Во-первых, предполагается, что направления прихода всех сортов ионов совпадают с вектором массовой скорости потока ионов солнечного ветра. Как уже отмечалось выше, это предположение обычно хорошо выполняется для солнечного ветра. Во-вторых, для всех отсчетов спектра использовалось одно отношение тепловой энергии потока к переносной  $\kappa = \kappa_i = \kappa_p = T_p/v_p^2$ , т.е. предполагалось, что за время измерения одного спектра ( $\sim 4$  мин.) гидродинамические параметры потока не изменяются и температуры всех ионов пропорциональны их массам. Как показали эксперименты (см. раздел 1.3.7 и обзор [14, Веселовский, 1984]), последнее соотношение в среднем хорошо выполняется в солнечном ветре.

Двумерная угловая характеристика датчика была получена путем интерполяции двух одномерных угловых характеристик анализатора, измеренных в лабораторных условиях в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, и показана на Рис. 2.9 линиями постоянного уровня, представляющими собой эллипсы и отличающиеся друг от друга в "e" ( $\approx 2,7$ ) раз. В диапазоне углов  $\sim 1,5^\circ$  (на уровне  $\sim 1/e$  от максимума) угловая характеристика симметрична по азимутальному углу, а при бóльших углах характеристика становится более крутой по углу  $\alpha$  (в плоскости перпендикулярной плоскости пластин анализатора), чем по углу  $\beta$ .

В предположении максвелловского распределения частиц на основании двумерной угловой характеристики датчика была рассчитана функция отклика анализатора при различных углах  $\gamma$  и  $\varphi$  и различной тепловой ширине потока  $\kappa$ :

$$F(\gamma, \varphi, \kappa) = \sqrt{f_\alpha^2(\gamma, \kappa) \sin^2(\varphi + \varphi_0) + f_\beta^2(\gamma, \kappa) \cos^2(\varphi + \varphi_0)}, \quad (2.16)$$

где  $f_\alpha$  и  $f_\beta$  - функции отклика, соответственно в перпендикулярной плоскости и в плоскости анализатора (см. Рис. 2.10),  $\varphi_0$  - постоянный сдвиг фазы между началами отсчета азимутального угла для цилиндров Фарадея и электростатического анализатора прибора СКС-04. Таким образом, измеренный отсчет в спектре  $y_{meas}$  может быть преобразован в величину  $y_{norm}$ , которая была бы измерена при нормальном падении потока ионов на анализатор:

$$y_{norm} = y_{meas}/F(\gamma, \varphi, \kappa). \quad (2.17)$$

Так как функция отклика была получена при некоторых предположениях и носит приближенный характер, то при массовой обработке данных указанная процедура ограничивалась уровнем  $1/F(\gamma, \varphi, \kappa) \leq 30$ , где неопределенность функции отклика в среднем составляет  $\leq 50\%$  при точных значениях параметров  $\gamma, \varphi$  и  $\kappa$  или коэффициент  $\sim 2$  при указанной выше неопределенности параметров  $\gamma, \varphi$  и  $\kappa$ .

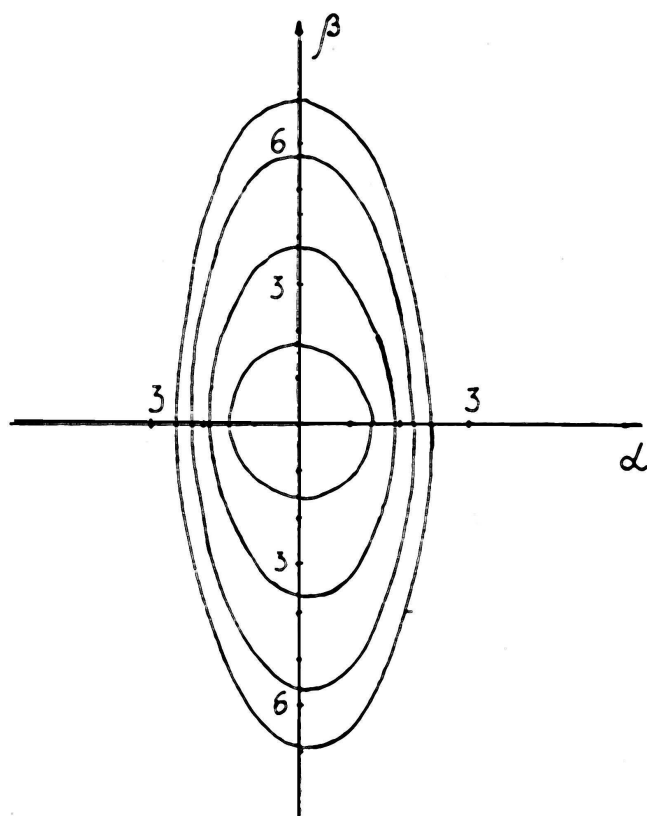


Рис. 2.9: Двумерная угловая характеристика электростатического анализатора прибора СКС-04 [23, Ермолаев, 1988]. Угол  $\alpha$  измеряется в плоскости перпендикулярной пластинам анализатора, угол  $\beta$  - в перпендикулярной плоскости.

Выделение отдельных пиков ионов на восстановленном таким образом энергетическом спектре затруднено тем, что энергетические ступени расставлены по энергии сравнительно редко (на  $\approx 14\%$ ), поэтому для анализа данных был использован предложенный в работе [131, Grunwaldt, 1976] способ: наложение нескольких спектров, измеренных при различных переносных скоростях солнечного ветра. Основное предположение, которое при этом делается, заключается в том, что переносные скорости всех ионов совпадают со скоростью солнечного ветра, что в среднем хорошо выполняется (см. раздел 1.3.6 и обзор [14, Веселовский, 1984]). При обработке данных прибора СКС-04 предполагалось, что массовые скорости всех ионов равны массовой скорости  $\alpha$ -частиц. В этом случае доля энергии каждой ступени на половину кинетической энергии  $\alpha$ -частиц на единицу заряда, можно преобразовать энергетический спектр ионов, измеренный в шкале  $E/q$ , в массовый спектр в шкале  $M/q$ .

Суперпозиция таких индивидуальных массовых спектров ионов, соответствующих разным переносным скоростям, позволяет получить достаточно подробный синтезированный массовый спектр. Пример такого синтезированного массового спектра ионов показан на Рис. 2.11. Он был получен по данным,

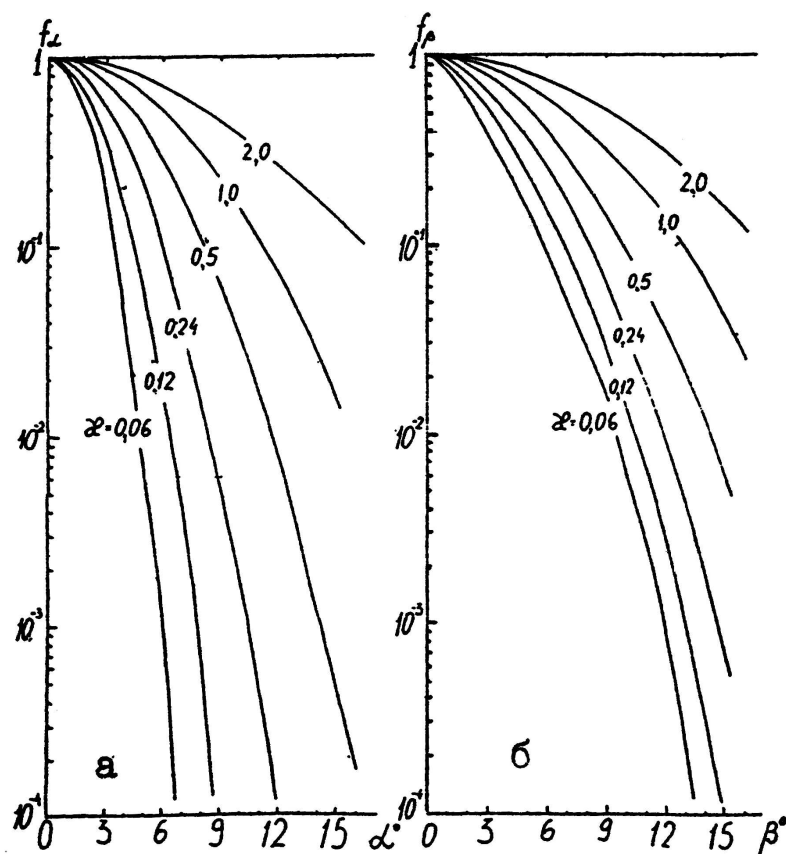


Рис. 2.10: Функция отклика электростатического анализатора прибора СКС-04 для различной тепловой ширины потока ионов в двух взаимноперпендикулярных плоскостях: а) по углу  $\alpha$ , б) по углу  $\beta$  [23, Ермолаев, 1988].

измеренным с 01.59 по 02.40 UT 11 декабря 1978 г., когда концентрация ионов составляла  $\sim 9,5 \text{ см}^{-3}$ , кинетические температуры протонов и  $\alpha$ -частиц -  $(2.3 \pm 0.5) \cdot 10^4 \text{ K}$  и  $(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^4 \text{ K}$ , соответственно, а массовая скорость  $\alpha$ -частиц медленно изменялась в пределах от 292 до 311 км/с. При аппроксимации всех отсчетов на синтезированном спектре использовалось предположение, что для всех ионов отношение кинетической температуры к их массе такое же, как и для  $\alpha$ -частиц. В этом случае формы всех пиков в логарифмической шкале по  $M/q$  будут близкими и в данном случае ширины пиков близки к энергетическому разрешению анализатора. Построенный таким образом синтезированный массовый спектр представляет собой самосогласованную картину многочисленных пиков, таких как кислород  $O^{7+}$ ,  $O^{6+}$ , кремний  $Si^{9+}$  -  $Si^{7+}$  и железо  $Fe^{13+}$  -  $Fe^{6+}$ .

Описанный выше метод получения синтезированных спектров может быть использован только в случае достаточного изменения скорости солнечного ветра ( $\sim 7\%$ ), в противном случае высоты пиков для некоторых ионов оказываются неопределенными, поэтому в дополнение к описанному методу

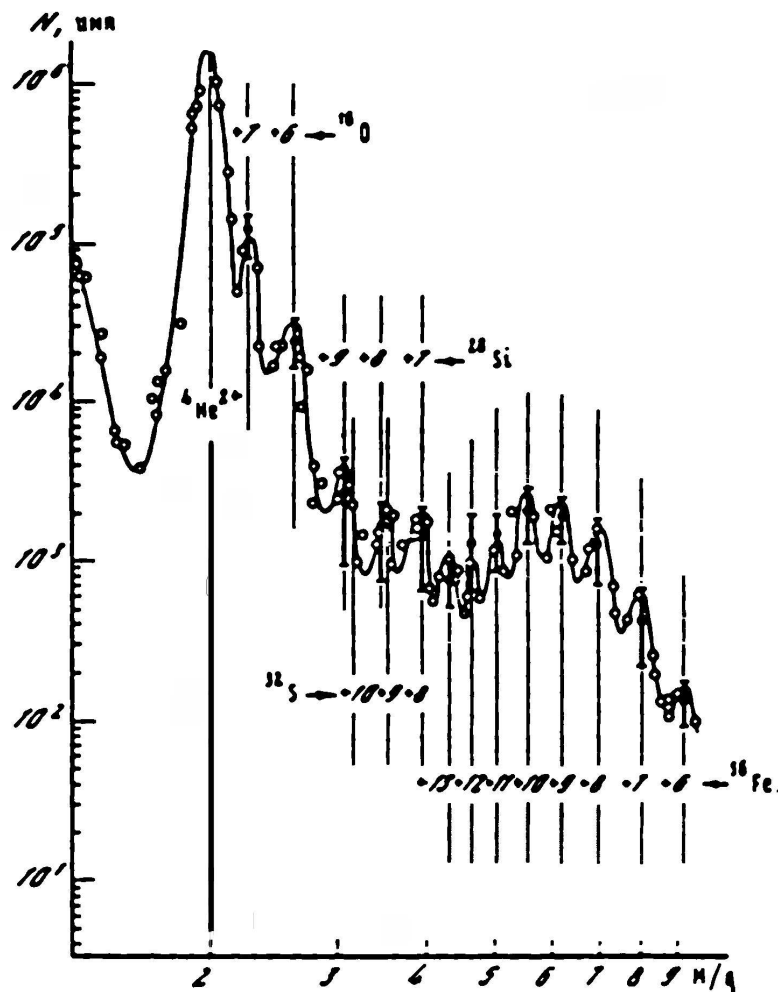


Рис. 2.11: Пример массового спектра, синтезированного из шести спектров электростатического анализатора, измеренных с 01.59 до 02.40 UT 11 декабря 1978 г. на спутнике *Прогноз 7* [9, Вайсберг и др., 1980]. Обозначения те же, что на Рис.2.8; кружки - рассчитанные вторым методом значения.

был использован второй метод. Этот метод заключается в том, что все отсчеты, расположенные вблизи (в пределах априори выбранной ширины пика  $\Delta M/M \sim 5\%$ ) положения максимума пика иона по шкале  $M/q$ , используются для определения высоты пика, при этом форма пика, также как и его положение, считается заданной. На каждом индивидуальном спектре высота пика определяется для всех возможных ионов. Для оценки точности определения высоты пика этим методом варьируются предполагаемая ширина пика (т.е. кинетическая температура данного сорта ионов) и положение пика в шкале  $M/q$  (т.е. переносная скорость данного сорта ионов) в пределах возможной неопределенности этих параметров.

Для получения вторым методом значений достаточно полного массового спектра суммируются данные нескольких индивидуальных спектров. На

Рис.2.11 точками показаны оценки высот пиков, полученные вторым методом. Эти результаты в пределах возможных ошибок, отмеченных на рисунке, находятся в хорошем соответствии с высотами пиков, полученных с помощью первого метода.

При сделанных предположениях величина отсчета в максимуме пика, полученным обоими методами, пропорциональна содержанию (концентрации) данного сорта ионов, а отношение высот пиков для ионов одного химического элемента, но разной степени ионизации, используется для определения ионизационной температуры на основе расчетов ионизационного баланса [63, Allen and Dupree, 1969]. Для учета вклада  $\alpha$ -частиц в пики кислорода  $O^{+7}$  и  $O^{+6}$  оценивались потоки  $\alpha$ -частиц при энергиях пиков этих ионов по данным селективного анализатора и вычитались из отсчетов в максимуме этих пиков. Различия в угловой и энергетической характеристиках селективного и простого анализаторов могут привести к тому, что таким образом будет компенсирован лишь частично вклад  $\alpha$ -частиц в пики ионов кислорода. Оценки с учетом реальных характеристик датчиков показывают, что при самых неблагоприятных условиях (большой угол отклонения осей датчиков от направления прихода потока ионов и высокая температура гелиевого пика) высота пика  $O^{+7}$  может в действительности оказаться на  $\sim 30\%$  меньше, чем полученная по использованной методике. Указанный эффект при определении высоты пика  $O^{+6}$  составляет  $\sim 2\%$ . В этом случае отношение содержания ионов  $O^{+7}/O^{+6}$  может оказаться меньше, что приведет к уменьшению ионизационной температуры на  $\sim 0.3 \cdot 10^6$  К и уменьшению оценки содержания кислорода на  $\sim 20\%$ .

По данным простого анализатора таким образом определяются среднечасовые (для некоторых интервалов средние за 2 часа) потоки кислорода, кремния и железа в скоростях счета  $n(O)$ ,  $n(Si)$  и  $n(Fe)$ , а также относительно кислорода  $n(Si)/n(O)$  и  $n(Fe)/n(O)$ . Из-за того, что пик  $\alpha$ -частиц часто оказывается в "зашкале" и трудностей разделения пиков  $\alpha$ -частиц и кислорода  $O^{+7}$ , достаточно надежная оценка содержания кислорода относительно гелия  $n(O)/n(He)$  может быть получена лишь на более длительных интервалах времени (до суток и более). Относительное содержание гелия  $n(He)/n(H)$ , как уже отмечалось выше, определяется по данным селективного анализатора также на длительных интервалах времени. Таким образом, содержание элемента  $X$  относительно протонов определяется по формуле:

$$n(X)/n(H) = (n(X)/n(O))_H * (n(He)/n(H))_C / (n(He)/n(O))_H, \quad (2.18)$$

где индексы "C" и "H" означают селективный и неселективный анализаторы, по данным которых определялись соответствующие относительные концентрации. Для получения оценок без использования величин, содержащих большую неопределенность, и сравнения с данными других экспериментов содержание кислорода, кремния и железа оценивалось также по формулам:

$$(n(X)/n(H))_1 = (n(X)/n(O))_H * (n(O)/n(H))_1, \quad (2.19)$$

$$(n(X)/(H))_2 = (n(X)/n(O))_H * (n(He)/n(H))_C / (n(He)/n(O))_2, \quad (2.20)$$

где  $(n(O)/n(H))_1 = (5,2 \pm 2) \cdot 10^{-4}$  - среднее содержание кислорода по данным спутников серий *Vela* и *Heos* [119, Geiss, 1985], а  $(n(He)/n(O))_2 = 75 \pm 20$  - среднее содержание гелия относительно кислорода по масс-спектрометрическим измерениям на спутнике *ISEE 3* [81, Vochsler et al., 1986].

Определение потоков тяжелых ионов по результатам измерений энерго-масс-анализатора ДФП-М на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* проводилось по методу, близкому к описанному в разделе 2.3.1. [31, 59, Ермолаев и др., 1986; Чичагов и др., 1988]. Предполагалось, что в выражении (2.11) для каждого сорта ионов распределение является максвелловским. Приборная функция, полученная в результате лабораторного и численного моделирования, может быть представлена в виде:

$$F = A \exp(-3(v_x^2/a^2 + v_y^2/b^2 + v_z^2/c^2)), \quad (2.21)$$

где  $A$  - нормировочная константа, а параметры  $a, b$  и  $c$  являются неявными функциями кинетической температуры данного сорта ионов. Если кинетическая температура известна, то поток данной ионной компоненты определяется выражением:

$$P_i = y_{ik}((1 + a^2/3)(1 + b^2/3)(1 + c^2/3))^{1/2}(A S a b c). \quad (2.22)$$

Если же из отдельного энергетического распределения не удастся определить кинетическую температуру данного сорта ионов, тогда спектр модулируется суперпозицией максвелловских распределений, и параметры подбираются методом наименьших квадратов так, чтобы вычисляемая по формуле (2.11) скорость счета наилучшим образом приближалась к результатам измерений. При этом учитывались ионы наиболее распространенных элементов, а химический состав предполагался близким к элементному составу солнечной атмосферы. Оценка погрешностей, связанных с методикой измерений и аппроксимацией данных, показывает, что потоки различных ионных компонент солнечного ветра определяются с точностью до множителя  $\sim 1,5$ .

## 2.4 Заключение

Таким образом при обработке результатов измерений, выполненных в солнечном ветре на спутниках *Прогноз 7*, *8* и *Прогноз-10-Интеркосмос*, 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  $\leq 1$  час.

С учетом характеристик прибора СКС-04 и ограниченности сделанных допущений могут быть оценены области определения и точности измерений ряда физических параметров, которые представлены в Табл. 2.3. В этой таблице представлены некоторые производные параметры и среди них: альвеновская скорость  $v_A$  и отношения времени расширения (распространения) плазмы солнечного ветра  $\tau_e$  [174, Neugebauer, 1981] к времени обмена импульсом  $\tau_s$  и к времени обмена энергией  $\tau_c$  при столкновениях, которые определяются по формулам:

$$v_A = B/(4\pi n m_p)^{1/2} = 21.8B/n^{1/2}, \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} \tau_e/\tau_c &= \text{const } n_p \exp(-x^2)/(v_p((m_\alpha T_\alpha + m_p T_p)/(m_\alpha + m_p))^{3/2}) = \\ &= 410n_p \exp(-x^2)/(v_p((4T_\alpha + T_p)/5)^{3/2}), \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} x &= (v_\alpha - v_p)/(2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p))^{1/2} = \\ &= (v_\alpha - v_p)/(13.85(T_\alpha/4 + T_p)^{1/2}), \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \tau_e/\tau_s &= \text{const } n_p G(x)/(v_p |v_\alpha - v_p| (2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p))) = \\ &= 5860 n_p G(x)/(v_p |v_\alpha - v_p| (T_\alpha/4 + T_p)), \end{aligned} \quad (2.26)$$

где  $G(x)$  - интеграл ошибок, затабулированный в [230, Spitzer, 1962]. При этом в правых частях уравнений (2.23 - 2.26), в которых приведены численные коэффициенты, магнитное поле  $B$  измеряется в нТ, концентрация -  $\text{см}^{-3}$ , скорости - км/с, температуры -  $10^4$  К.

Как показал статистический анализ, усреднение параметров  $T_\alpha/T_p$  и  $n_\alpha/n_p$ , испытывающих большие вариации, приводит к завышению средней величины, поэтому для получения более надежных оценок средних величин этих параметров необходимо ограничивать интервал усреднения двумя дисперсиями  $\sigma$  этих параметров, получаемых по всему массиву данных. Средние значения  $T_\alpha/T_p$  и  $n_\alpha/n_p$ , определенные без ограничения интервала усреднения, оказываются завышенными, соответственно, на  $\sim 20\%$  и  $\sim 30-40\%$  по сравнению со средними значениями, определенными при ограничении интервала на уровне  $\pm 2\sigma$  [32, Ермолаев и др., 1988].



Таблица 2.3: Область определения и точность измерения физических параметров с помощью прибора СКС-04

Параметр	Область определения	Точность	Тип датчика	Примечание
$v_p$ , км/с	230-900	2-3%	сел.ЭА	
$v_\alpha$ , км/с	170-620	2-3%	сел.ЭА	
$T_p$ , $10^4$ К	$> 0.1$	20-25%	сел.ЭА	
$T_\alpha$ , $10^4$ К	$> 0.1$	20-25%	сел.ЭА	
$P$ , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	i: $10^7 - 10^{10}$	20%	ЦФ	
	e: $10^7 - 10^9$	20%	ЦФ	
$n$ , $\text{см}^{-3}$	0.4-100	20%	ЦФ+сел.ЭА	
$v_A$ , км/с	1-3000	15%	ЦФ+сел.ЭА+СГ-76	при $\Delta B/B \sim 5\%$
$v_\alpha - v_p$ , км/с		5%	сел.ЭА	
$(v_\alpha - v_p)/v_A$		20%	ЦФ+сел.ЭА+СГ-76	
$v_\alpha/v_p$		5%	сел.ЭА	
$T_\alpha/T_p$		40%	сел.ЭА	1 измерение
		5%	сел.ЭА	100 измерений
		2-3 раз	сел.ЭА	1 измерение
		30%	сел.ЭА	100 измерений
$\tau_e/\tau_s$	$10^{-5} - 10^2$	1.7-2 раз	ЦФ+сел.ЭА	
$\tau_e/\tau_c$	$10^{-5} - 10^2$	1.7-2 раз	ЦФ+сел.ЭА	
$n(O)$		2-3 раз	простой ЭА	1 измерение
		80%	простой ЭА	1 час
$n(Si)$		2 раз	простой ЭА	1 измерение
		60%	простой ЭА	1 час
$n(Fe)$		2 раз	простой ЭА	1 измерение
		60%	простой ЭА	1 час
$T(O)$		30%	простой ЭА	1 час
$T(Si)$		20%	простой ЭА	1 час
$T(Fe)$		20%	простой ЭА	1 час

В Табл. 2.3 представлены также неопределенности параметров тяжелых ионов: содержания и ионизационной температуры ионов кислорода, кремния, железа  $n(O), n(Si), n(Fe), T(O), T(Si)$  и  $T(Fe)$ , а также содержания гелия относительно кислорода  $n(He)/n(O)$ .

## Глава 3

# Среднестатистические характеристики солнечного ветра

В настоящей главе представлены в основном результаты о характеристиках солнечного ветра, полученные на ранней стадии нашего анализа без учета структуры солнечного ветра. Мы сочли необходимым представить эти результаты здесь, чтобы, с одной стороны, показать место наших результатов (включая и методические вопросы, такие как интеркалибровка измерений, выполненных разными инструментами на разных КА) в общей картине исследований солнечного ветра, а с другой стороны, проведенный анализ демонстрирует трудности, возникающие при попытке интерпретации данных без учета структуры солнечного ветра.

Основные результаты настоящей главы получены по данным селективных измерений, выполненных с помощью прибора СКС-04 на спутнике *Прогноз 7*.

### 3.1 Средние значения параметров солнечного ветра

Общей характеристикой периода наблюдений на спутнике *Прогноз 7* (ноябрь 1978 г. - июль 1979 г.) могут служить данные Табл. 3.1, где представлены средние значения, среднеквадратичные отклонения и интервалы вблизи максимумов распределений, содержащие большую часть ( $> 60\%$ ) данных, для ряда основных параметров солнечного ветра: массовые скорости протонов  $v_p$  и  $\alpha$ -частиц  $v_\alpha$ , кинетические температуры протонов  $T_p$  и  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha$ , концентрация ионов  $n$ , модуль магнитного поля  $B$ , альвеновская скорость  $v_A$  и ряд производных величин  $v_\alpha/v_p$ ,  $v_\alpha - v_p$ ,  $(v_\alpha - v_p)/v_A$ ,  $T_\alpha/T_p$ ,  $n_\alpha/n_p$ .

В Табл. 3.1 приведены для сравнения средние значения некоторых параметров солнечного ветра из работы [168, Mullan, 1983], полученные по данным спутника *ISEE 3* на близком временном интервале (август 1978 г. - февраль 1979 г.). Результаты обоих экспериментов находятся в

Таблица 3.1: Средние параметры солнечного ветра по данным ИСЗ *Прогноз 7* (ноябрь 1978 - июль 1979) и *ISEE 3* (август 1978 - февраль 1980)

Параметр	Прогноз 7				ISEE 3	
	Среднее $\pm$ ср.кв.откл.	60%-ный интервал	Число измер.	Интервал усреднен.	Сред. знач.	Числ. изм.
$v_p$ , км/с	437 $\pm$ 87	340-480	11153	270-800	420	2117
$v_\alpha$ , км/с	432 $\pm$ 80	350-500	10758	270-800		
$T_p$ , эВ	10,3 $\pm$ 12,8	2-10	11154	0,1-100	8,5	2117
$T_\alpha$ , эВ	40,3 $\pm$ 40,9	0-40	10750	0,3-200		
$n$ , см $^{-3}$	9,2 $\pm$ 7,8	2-8	11155	0-40	8,3	2117
$B$ , нТ	7,9 $\pm$ 4,7	4-9	5549	0-40		
$v_A$ , км/с	62 $\pm$ 27	40-80	5512	0-200		
$v_\alpha - v_p$ , км/с	3 $\pm$ 22	-15-20	10733	-100-100		
$(v_\alpha - v_p)/v_A$	0,04 $\pm$ 0,43	-0,2-0,4	5196	-1,5-1,5		
$v_\alpha/v_p$	1,007 $\pm$ 0,054	0,97-1,05	10749	0,7-1,3		
$T_\alpha/T_p$	5,0 $\pm$ 3,9	0,5-5,0	10621	0,1-30		
$n_\alpha/n_p$	4,3 $\pm$ 2,8	0,5-5,0	9872	0,3-12,5		
	6,5 $\pm$ 6,5	0-6	10423	0-35		
	5,4 $\pm$ 3,9	0-6	9805	0,03-20,0		
	3,8 $\pm$ 2,9	0-6	8780	0,03-10,5		

Таблица 3.2: Время регистрации межпланетных ударных волн (IS) и геомагнитных возмущений (SSC) в период работы ИСЗ *Прогноз 7*

Дата	Время, UT	IS	SSC	Дата	Время, UT	IS	SSC
12.12.1978	09.54	+		09.03.1979	08.07	+	
14.12.	01.27		+	09.03.	08.09		+
29.12.	16.24	+	+	15.03.	05.56	+	+
04.01.1979	17.25		+	17.03.	02.31		+
06.01.	01.25	+		24.03.	08.26		+
06.01.	23.30		+	24.03.	10.10		+
06.01.	23.32	+		27.03.	07.58		+
09.01.	03.40		+	28.03.	08.25	+	
09.01.	03.48	+		28.03.	08.27		+
25.01.	01.39		+	05.04.	01.55		+
25.01.	01.40	+		05.04.	01.58	+	
03.02.	18.23		+	17.04.	00.37		+
03.02.	18.32	+		24.04.	23.57		+
18.02.	03.04		+	25.04.	00.00	+	
04.03.	04.46		+	29.04.	18.52	+	
04.03.	04.47	+					

хорошем согласии (в пределах статистического разброса), и систематических расхождений этих данных не наблюдается.

Как уже отмечалось в разделе 2.4, средняя величина параметров  $T_\alpha/T_p$  и  $n_\alpha/n_p$  существенно зависит от интервала усреднения и более надежными оценками являются средние значения, определенные на интервалах, ограниченных двумя среднеквадратичными отклонениями от средней величины. Поэтому в Табл. 3.1 для этих параметров приведены результаты усреднения, как на достаточно широких интервалах усреднения (см. первые строчки Табл. 3.1 для указанных параметров), так и на интервалах усреднения, ограниченных со стороны больших значений двумя среднеквадратичными отклонениями (см. вторые строчки указанных параметров). Дальнейшее уменьшение верхней границы интервала усреднения приводит к уменьшению оценки средней величины (см. третью строчку для параметра  $n_\alpha/n_p$ ). Наиболее репрезентативными оценками средних параметров  $T_\alpha/T_p$  и  $n_\alpha/n_p$ , по-видимому, являются  $4.3 \pm 2.8$  и  $5.4 \pm 3.9\%$ , соответственно, при этом оценка средней величины отношения температур  $T_\alpha/T_p$  близка к отношению средних величин  $T_\alpha$  и  $T_p$ , содержащихся в Табл. 3.1.

Средние значения, полученные на большом статистическом материале, могут быть сопоставлены с общим долговременным ходом характеристик солнечного ветра [174, 112, 14, Neugebauer, 1981; Feynman, 1983; Веселовский, 1984]. Период наблюдений на спутнике *Прогноз 7* пришелся на восходящую ветвь 21-го цикла солнечной активности непосредственно перед его максимумом. На Рис. 3.1 представлены (по данным [14, Веселовский, 1984]) долгопериодические вариации некоторых параметров солнечного ветра (скорости, концентрации, модуля магнитного поля и относительной концентрации  $\alpha$ -частиц) и числа солнечных пятен почти за два цикла солнечной активности с 1962 по 1980 гг. На этом же рисунке светлыми кружками отмечены средние значения соответствующих параметров из Табл. 3.1. Результаты измерений на спутнике *Прогноз 7* хорошо вписываются в картину крупномасштабного поведения солнечного ветра. В частности, подтверждается возрастание относительного содержания  $\alpha$ -частиц в максимуме цикла солнечной активности (см. также Табл. 3.3).

## 3.2 Вариации основных параметров солнечного ветра

Одной из возможных причин разброса значений параметров солнечного ветра, измеренных за время порядка нескольких минут, является изменение формы энергетических распределений ионных составляющих на меньших временных масштабах. Хотя высокая стабильность формы энергетических спектров ионов, измеренных с помощью прибора СКС-04 за время 4 минуты на участках спокойного солнечного ветра (т.е. таких участках, где отсутствуют

Таблица 3.3: Относительное содержание  $\alpha$ -частиц в солнечном ветре.

Космический аппарат	Период месяц/год	$n_\alpha/n_p, \%$	Источник информации	Примечание
Mariner 2	08/62-12/62	$4.6 \pm 3.8$	[180] Neugebauer & Snyder, 1966	
Vela 3	07/65-08/65	4.2	[146] Hundhausen et al., 1967	
Explorer 34	05/67-01/68	$5.1 \pm 2.0$	[190] Ogilvie & Wilkerson, 1969	
Heos 1	12/68-03/69	$5.5 \pm 0.5$	[114] Formisano et al., 1970	
Vela 3	07/65-08/65	4.3	[205] Robbins et al., 1970	
Vela 3	07/65-07/67 07/66-07/67	3.4	[136] Hirshberg et al., 1972	
Explorer 43	03/71-04/71	4.2	[185] Ogilvie, 1972	
Heos 1	12/68-04/70	5.2	[167] Moreno & Pal- miotto, 1973	по Рис.1 в [167]
Mariner 2	08/62-12/62	$3.2 \pm 1.0$	[188] Ogilvie & Hirs- hberg, 1974	*
Vela 3	07/65-03/66	$3.4 \pm 0.4$		спокойный ветер
	03/66-07/67	$3.9 \pm 0.4$		возмущен. ветер
Explorer 34	05/67-01/68	$5.1^{+0.0}_{-0.1}$		*
OGO 5	03/68-04/69	$4.6 \pm 1.0$		
Heos 1	12/68-04/70	5.1		*
Explorer 43	03/71-04/71	$4.7 \pm 0.7$		*
Apollo 15	08/71-06/72	4.1		
IMP 6-8	03/71-07/74	$3.8 \pm 1.8$ $4.8 \pm 0.5$	[74] Bame et al., 1977	$v < 350$ км/с $v > 650$ км/с
IMP 6-8	03/71-01/77	3.1-5.3	[108] Feldman et al., 1978	среднее за 27 суток
Прогноз 7	11/78-06/79	$5.4 \pm 3.9$ $3.0 \pm 2.8$	[22] Ермолаев, 1987 [32] Ермолаев и и др., 1988	$T_p \geq 3 \cdot 10^5 \text{K}$

\* – результаты получены с учетом методических особенностей функционирования аппаратуры и отличаются от полученных ранее

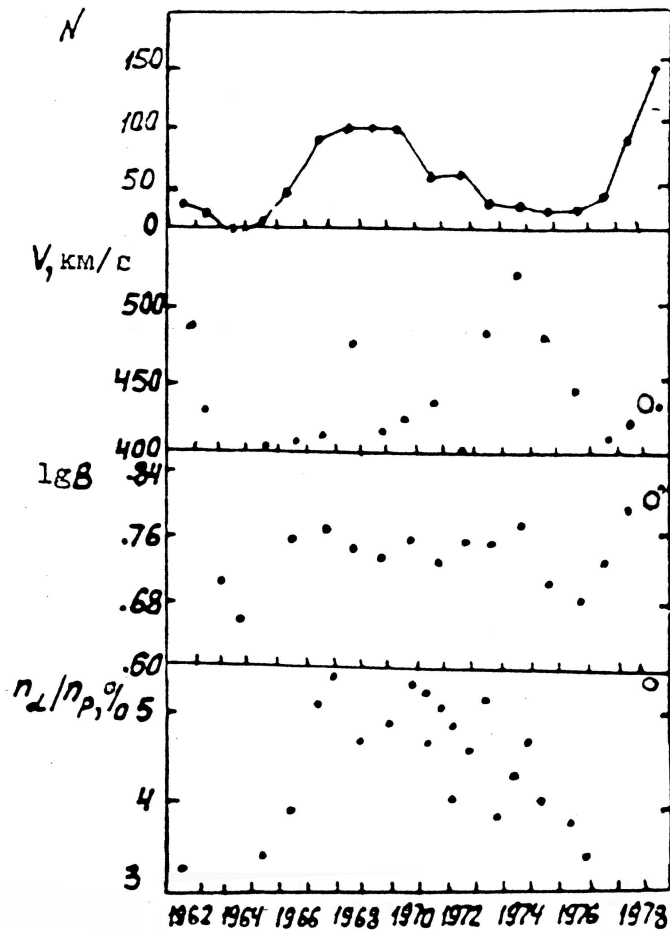


Рис. 3.1: Долгопериодические вариации числа солнечных пятен  $N$  и параметров солнечного ветра (переносной скорости  $v$ , величины магнитного поля  $B$  и относительного содержания гелия  $n_{\alpha}/n_p$ ) в цикле солнечной активности [14, Веселовский, 1984]. Светлые кружки – данные спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988].

резкие структурные границы), косвенно свидетельствуют в пользу гипотезы о стабильности спектров и на меньших временных масштабах, эта гипотеза была проверена экспериментально путем измерения энергетических спектров солнечного ветра с рекордным временным разрешением 1.36 с и 0.64 с, соответственно, с помощью прибора МОНИТОР (*Прогноз 8*) [37, 67, Застенкер и др., 1982; Avakov et al., 1985] и комплекса приборов БИФРАМ (*Прогноз-10-Интеркосмос*) [76, 39, Bedrikov et al., 1985; Застенкер и др., 1986].

Пример быстрых измерений спектров ионов солнечного ветра показан на Рис. 3.2. Каждый спектр, состоящий из 32 энергетических ступенек, был измерен с помощью одного из электростатических анализаторов прибора ВУ комплекса БИФРАМ за время 0.64 с. Высокая стабильность формы пиков протонов ( $E/q = 0.6$  кэВ) и  $\alpha$ -частиц ( $E/q = 1.2$  кэВ) приводит к стабильности гидродинамических параметров этих двух компонент солнечного ветра.

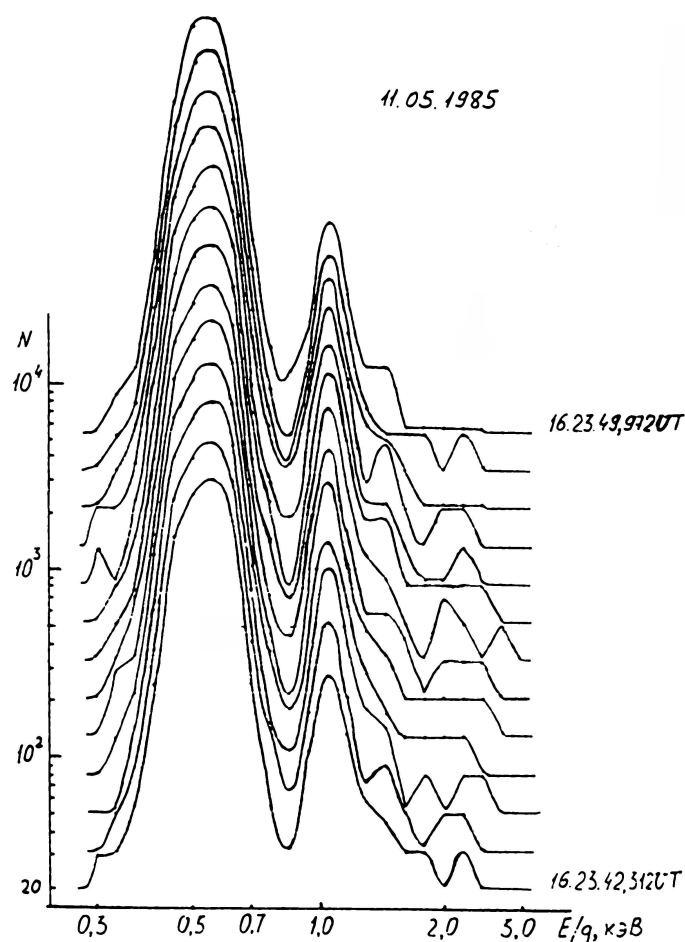


Рис. 3.2: Последовательность энергетических спектров ионов солнечного ветра, измеренных с высоким временным разрешением (один спектр измерялся за 0.64 с) с помощью плазменного комплекса БИФРАМ на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* [12, Вайсберг и др., 1986].

Приведенный на Рис. 3.2 пример интересен еще тем, что на высокоэнергичном склоне пика  $He^{++}$  наблюдаются следы ионов кислорода  $O^{+7}$  и  $O^{+6}$ , а также отдельные небольшие пики в районе  $E/q = 2.5$  кэВ, которые могут быть интерпретированы как ионы кремния [12, Вайсберг и др., 1986]. Из-за малого времени экспозиции на каждой ступени величина отсчетов, соответствующих ионам более тяжелым, чем  $\alpha$ -частицы, лишь в 2-3 раза превышает уровень фона. Поэтому эти данные не позволяют получить надежные оценки параметров потоков тяжелых частиц.

На основе измерений энергетических спектров ионов солнечного ветра с помощью прибора МОНИТОР с временным разрешением 1.36 с. была изучена мелкомасштабная структура солнечного ветра на фронте резкого возрастания скорости потока плазмы. Обнаружено, что в этой области продолжительностью



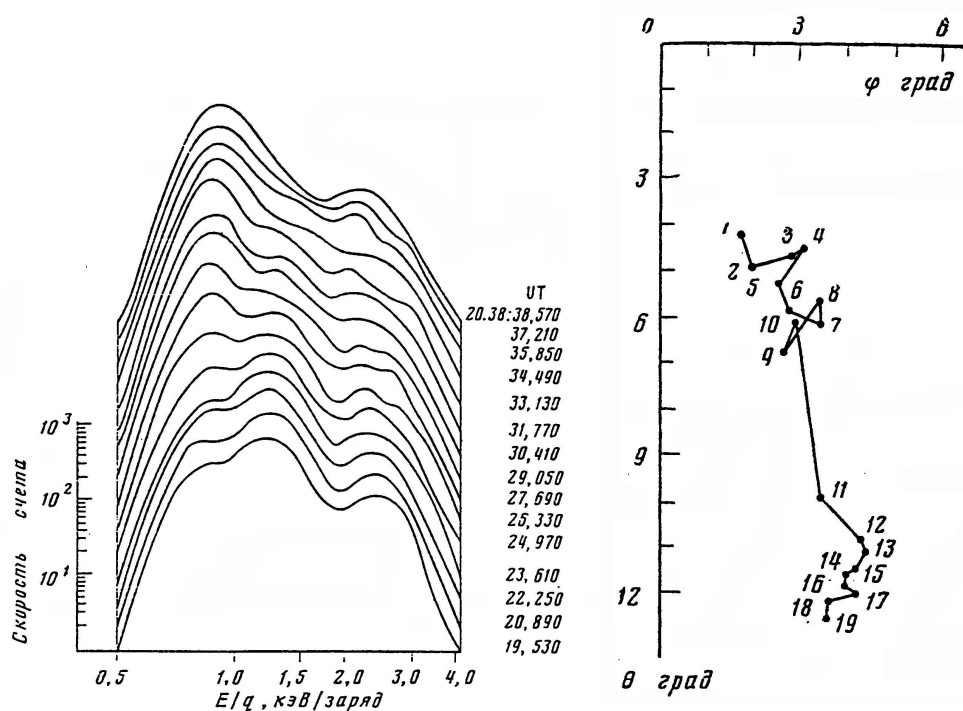


Рис. 3.3: Результаты измерений сравнительно медленного перехода от потока солнечного ветра со скоростью  $v = 470$  км/с к более медленному потоку с  $v = 420$  км/с, полученные 04 января 1981 г. с помощью прибора МОНИТОР на спутнике *Прогноз 8* [1, Аванов и др., 1984]. **Левая панель.** Последовательность энергетических спектров ионов, время начала каждого спектра показано справа. **Правая панель.** Временная эволюция углов прихода потока при быстром обратном переходе от одного течения к другому.

около 2 часов многократно наблюдаются два разноскоростных потока плазмы, имеющих разные направления течения, при этом длительности скачков гидродинамических параметров составляют от  $\sim 1.5$  до  $\sim 10$  с. [1, Аванов и др., 1984].

На Рис. 3.3 приведен пример последовательного измерения энергетических спектров ионов при переходе от течения солнечного ветра со скоростью 470 км/с к течению со скоростью 420 км/с, при этом температура уменьшается от  $\sim 2 \cdot 10^5$  К до  $\sim 10^5$  К и концентрация возрастает от  $\sim 10$  до  $\sim 12$  см $^{-3}$ . Этот пример интересен тем, что смена режима происходит через промежуточное состояние, характеризующееся возникновением двух пиков как на протонной, так и на гелиевой составляющей солнечного ветра. Кроме того, приведенный пример показывает, что поведение  $\alpha$ -частиц во многом аналогично поведению протонов. Однако в данном случае  $\alpha$ -частицы более инерционны по отношению к протонам, поскольку перемещение гелиевого пика в сторону больших энергий происходит несколько медленнее, чем протонного.

Для более быстрого ( $\sim 1.5$  с) обратного перехода от скорости 425 км/с к скорости 470 км/с на правой панели Рис. 3.3 показана динамика изменения

углов прихода, усредненных за время измерения одного спектра. По оси абсцисс отложены значения угла между проекцией вектора потока на плоскость эклиптики и осью  $X$  солнечно-эклиптической системы координат (угол  $\varphi$ ), положительное направление которого отсчитываются от оси  $+X$  к оси  $+Y$ . По оси координат отложены значения угла между векторами потока и плоскостью эклиптики (угол  $\theta$ ), положительное направление которого отсчитывается от плоскости эклиптики в сторону оси  $+Z$ . Обращают на себя внимание две различные группировки точек, соответствующие углам  $\varphi$  и  $\theta$ , соответственно, ( $3^\circ$  и  $-6^\circ$ ) и ( $4^\circ$  и  $-11^\circ$ ). Первая группа точек характеризует углы прихода потока до момента резкого возрастания скорости, вторая соответствует высокоскоростному режиму течения плазмы. Таким образом, изменение скорости и температуры солнечного ветра сопровождается резким поворотом потока за время не более  $\sim 1.5$  с.

Следовательно, быстрые измерения энергетических спектров ионов солнечного ветра позволяют сделать следующие два вывода. Во-первых, на участках спокойного солнечного ветра энергетические спектры ионов, измеренные с временными разрешениями  $\sim 1$  с и  $\sim 4$  минут, и определенные по ним гидродинамические параметры близки между собой. Об этом свидетельствуют, в частности, результаты одновременных измерений гидродинамических параметров солнечного ветра с помощью приборов СКС-04 и МОНИТОР на спутнике *Прогноз 8* [37, Застенкер и др., 1982].

Во-вторых, форма спектров и гидродинамические параметры ионов, измеренные за время  $\sim 1$  мин., могут быть искажены лишь вблизи резких структурных границ в солнечном ветре, таких как межпланетные ударные волны. Области взаимодействия разноскоростных течений обычно наблюдаются на масштабах от нескольких десятков минут до нескольких десятков часов, поэтому спектры, измеренные за время  $\sim 4$  мин, по-видимому, не искажаются. Таблица 3.2 показывает моменты прохождения межпланетных ударных волн (IS), зарегистрированные непосредственно на спутнике *Прогноз 7* или по внезапному началу магнитной бури (SSC). Так как такие явления являются достаточно кратковременными и составляют лишь малую долю от общего времени наблюдения солнечного ветра, то они не вносят значительных погрешностей в значения гидродинамических параметров, усредненных на временных масштабах, превышающих десятки минут. Поэтому медленные измерения, выполненные с помощью прибора СКС-04, могут быть использованы для изучения крупномасштабных вариаций ионной компоненты солнечного ветра.

Представленные на Рис. 3.1 и в Табл. 3.1 данные не дают полного представления о вариациях указанных параметров в солнечном ветре, так как их распределения отличаются от нормального закона со средним значением в максимуме распределения. Достаточно характерным является распределение концентрации ионов  $n$  на Рис. 3.4а. Несмотря на то, что максимум гистограммы лежит в интервале  $4-7 \text{ см}^{-3}$ , вследствие длинного "хвоста" распределения

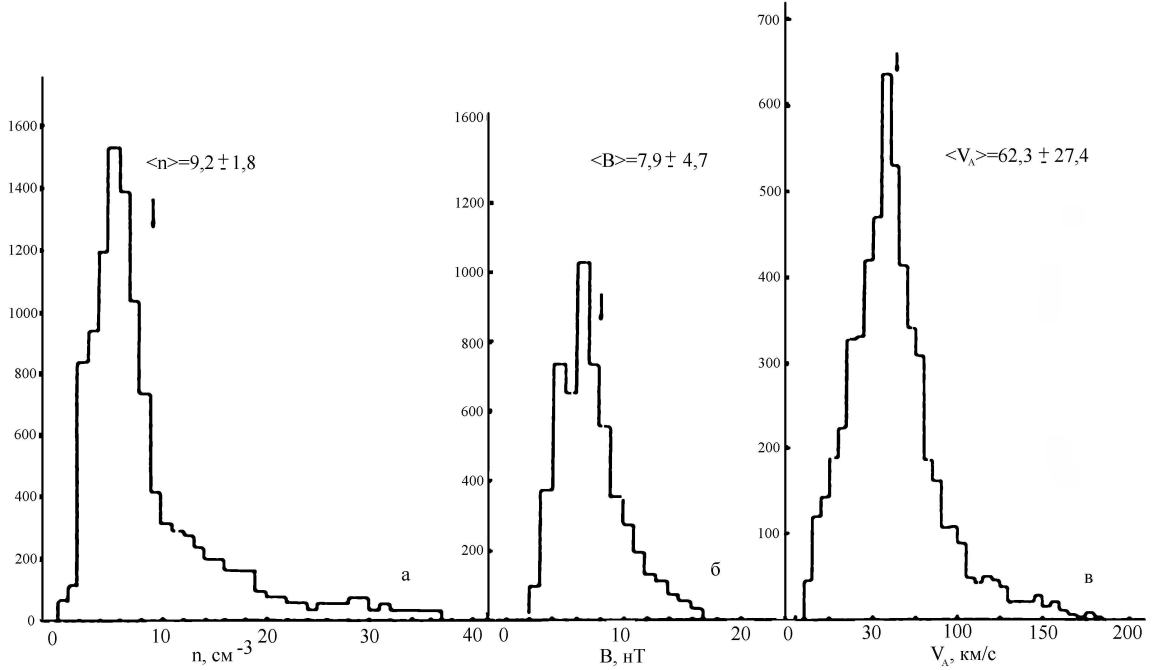


Рис. 3.4: Гистограммы распределения параметров солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]: а) концентрация ионов  $n$ , б) модуля магнитного поля  $B$  и в) величины альвеновской скорости  $v_A$ .

среднее значение составляет  $9.2 \text{ см}^{-3}$  со среднеквадратичным отклонением  $7.8 \text{ см}^{-3}$ . Такие же особенности имеют распределения модуля магнитного поля  $B$  и альвеновской скорости  $v_A$ , представленные, соответственно, на Рис. 3.4б и 3.4в, а также некоторых других параметров.

На Рис. 3.5 показаны гистограммы переносных скоростей протонов  $v_p$  (сплошная линия) и  $\alpha$ -частиц  $v_\alpha$  (штриховая линия). Как отмечалось в предыдущей главе, в соответствии с верхней границей энергетического диапазона прибора СКС-04 надежные измерения переносной скорости  $\alpha$ -частиц возможны только до  $\sim 620 \text{ км/с}$ , а протонов до  $\sim 900 \text{ км/с}$ . Это хорошо видно по резкому обрыву гистограммы  $v_\alpha$  вблизи указанного значения при более плавном уменьшении гистограммы  $v_p$ . По этой причине, очевидно, среднее значение  $v_\alpha$  в Табл. 3.1 оказывается слегка заниженным.

Так как частоты попадания скоростей протонов и  $\alpha$ -частиц в отдельные интервалы гистограмм не совпадают, то это означает, что скорости протонов и  $\alpha$ -частиц часто не равны между собой. Поэтому представляет интерес гистограмма отношения скоростей  $v_\alpha/v_p$ , показанная на Рис. 3.6. На этом же рисунке представлены результаты, полученные на спутниках *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977] и *IMP 6* и *7* [65, Asbridge et al., 1976]. По данным спутников *IMP 6* и *7* были получены более узкие распределения ( $\sim 2\%$

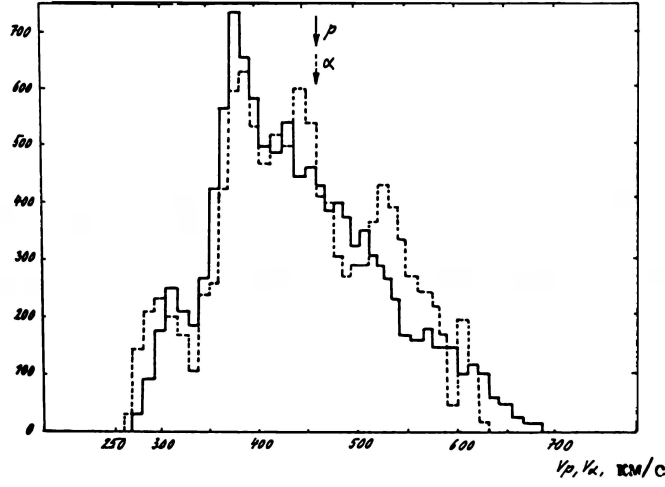


Рис. 3.5: Гистограммы распределения скоростей протонов  $v_p$  (сплошная линия) и  $\alpha$ -частиц  $v_\alpha$  (штриховая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988].

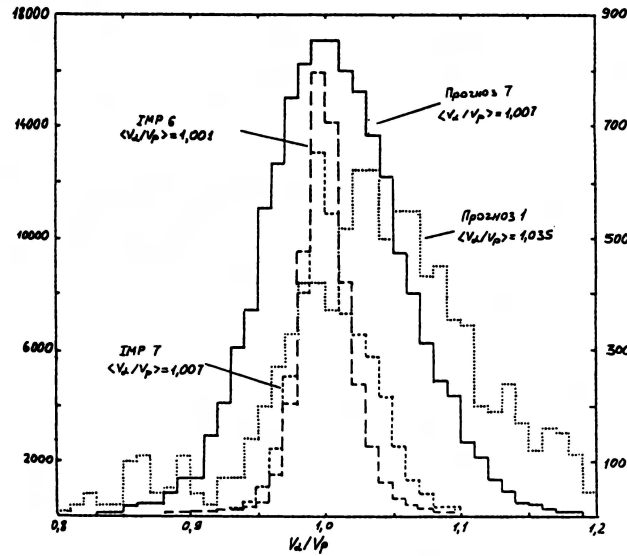


Рис. 3.6: Гистограммы распределения отношения массовых скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha/v_p$  по данным спутников *IMP 6*, *7* [65, Asbridge et al., 1976], *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977] и *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988].

Таблица 3.4: Средние значения отношения массовых скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов солнечного ветра

Космический аппарат	Период месяц/год	$v_\alpha/v_p$	Источник информации
Vela 3	07/65-07/67	$1.02 \pm 0.03$	[205] Robbins et al., 1970
Explorer 34	05/67-01/68	$1.004 \pm 0.03$	[191] Ogilvie & Zwally, 1972
Neos 1	12/68-03/69	1.02	[82] Bollea et al., 19772
IMP 6	03/71-04/71	1.018	[186] Ogilvie, 1975
IMP 6	03/71-07/72	$1.001(\pm 0.02)$	[65] Asbridge et al., 1976
IMP 7	01/73-05/73	$1.007(\pm 0.02)$	
Прогноз 1	04/72-07/72	1.03	[40] Зерцалов и др., 1976
		1.035	[86] Bosqued et al., 1977
Neos 2	02/72-08/74	1.004	[132] Grunwaldt & Rosenbauer, 1978
ISEE 3	02/79-04/79	1.04	[193] Ogilvie et al., 1982
Прогноз 7	11/78-06/79	$1.005 \pm 0.055$	[21] Ермолаев, 1986
		* $0.96 \pm 0.04$	[68] Avanov et al., 1987
		$1.007 \pm 0.054$	[32] Ермолаев и др., 1988
		** $0.998 \pm 0.076$	

\* - за фронтом межпланетных ударных волн  
\*\* - при температуре  $T_p \geq 3 \cdot 10^5$  K

на полувывсоте от максимума), чем по данным спутников *Прогноз 1* и *7* ( $\sim 5\%$ ), что, по-видимому, связано с более высокой точностью определения гидродинамических параметров на спутниках *IMP 6* и *7* за счет измерения двумерного распределения ионов по энергии при вращении космических аппаратов вокруг оси, перпендикулярной плоскости эклиптики. Все четыре космических эксперимента подтверждают вывод о том, что в среднем  $\alpha$ -частицы движутся в солнечном ветре быстрее, чем протоны (см. Табл. 3.4). Однако представленные гистограммы свидетельствуют о том, что наблюдается достаточно большое число случаев, когда скорости  $\alpha$ -частиц оказываются меньше скорости протонов.

Гистограммы кинетических температур протонов  $T_p$  (сплошная линия) и  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha$  (штриховая линия) показаны на Рис. 3.7. Масштаб  $T_\alpha$  сжат в четыре раза по сравнению с масштабом  $T_p$ , чтобы подчеркнуть диапазон температур, где отношение температур  $T_\alpha/T_p$  отличается от средней величины  $\sim 4$ . В частности, из рисунка видно, что при низких температурах протонов ( $T_p < 2 \cdot 10^4$  K) наблюдается большое число случаев с  $T_\alpha < 8 \cdot 10^4$  K, что свидетельствует о том, что в этом диапазоне температур в среднем  $T_\alpha/T_p < 4$ . В то же время при более высоких температурах ( $T_p > 10 \cdot 10^4$  K) это отношение становится  $\geq 4$ .

На Рис. 3.8 показана гистограмма отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  для 5 космических экспериментов *Explorer 34*,

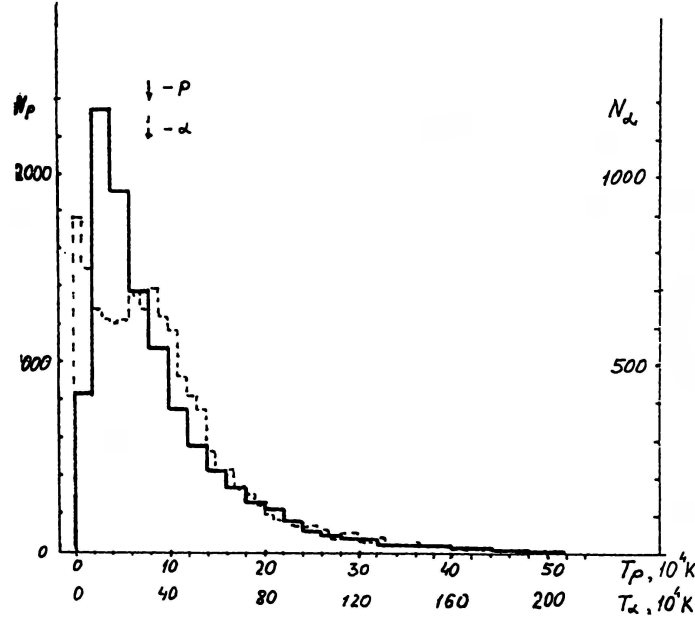


Рис. 3.7: Гистограммы распределения температур протонов  $T_p$  (сплошная линия) и  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha$  (штриховая линия по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]).

*Vela 3*, *OGO 5*, *Прогноз 1* и *7*, для которых средние величины, соответственно, составили: 3.0, 4.02, 4.87, 3.6, 4.3 [174, 86, 32, Neugebauer, 1981; Bosqued et al., 1977; Ермолаев и др., 1988] (см. Табл. 3.5). Все гистограммы имеют достаточно высокие частоты наблюдений параметров в широком диапазоне значений от  $\sim 1$  до  $\sim 6$ , что свидетельствует о наличии как потоков солнечного ветра, в которых ионная компонента изотермична ( $T_\alpha = T_p$ ), так и потоков, в которых ионы имеют близкие тепловые скорости ( $T_\alpha/T_p = 4$ ). Кроме того, для всех экспериментов гистограммы имеют протяженные "хвосты" ( $T_\alpha/T_p > 10$ ), которые, как уже отмечалось выше, могут привести к увеличению оценок средних величин  $T_\alpha/T_p$ .

Анализ 14 событий в горячем ( $T_p > 3 \cdot 10^5$  K) солнечном ветре, наблюдавшемся в течение периода от нескольких часов до суток после прохождения межпланетных ударных волн (регистрировавшихся непосредственно на спутнике *Прогноз 7* или по внезапным началам геомагнитных бурь - SSC) (см. Табл. 3.2), показал, что за фронтом ударных волн скорость  $\alpha$ -частиц часто оказывается меньше скорости протонов, и средние отношения переносных скоростей и кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha/v_p$  и  $T_\alpha/T_p$  заметно ниже, чем в среднем для всего периода наблюдений [9, 32, Вайсберг и др., 1980а; Ермолаев и др., 1988]:  $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 0.96 \pm 0.04$  и  $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 3.0 \pm 1.2$  (см. Рис. 3.9).

На Рис. 3.10 и 3.11 показаны, соответственно, гистограммы  $v_\alpha/v_p$  и  $T_\alpha/T_p$ , полученные на более широком материале для различных температур

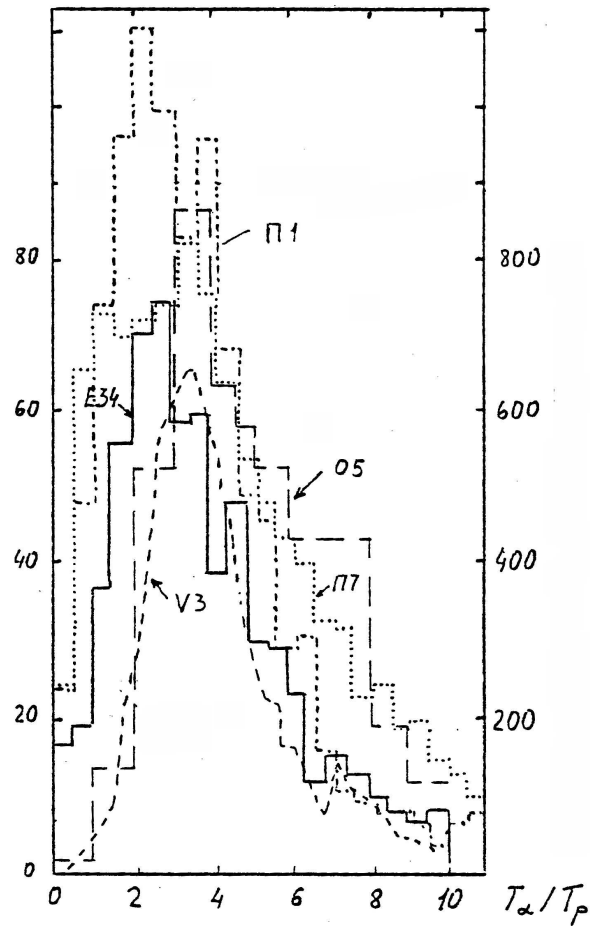


Рис. 3.8: Гистограммы распределения отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  по данным спутников *Vela 3*, *Explorer 34*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977] и *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]

Таблица 3.5: Средние значения отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов солнечного ветра

Космический аппарат	Период месяц/год	$T_\alpha/T_p$	Источник информации
Explorer 34	06/67-12/67	1.6-5.0	[190] Ogilvie & Wilkerson, 1969
Explorer 34	06/67-12/67	3.75	[88] Burlaga & Ogilvie, 1970
Explorer 34	05/67-01/68	$3.0 \pm 1.0$	[191] Ogilvie & Zwally, 1972
Vela 3	07/65-07/67	$4.02 \pm 2.5$	[205] Robbins et al., 1970
Прогноз 1	04/72-09/72	3.6	[40] Зерцалов и др., 1976
		3.83	[86] Bosqued et al., 1977
OGO 5	03/68-04/71	4.87	[174] Neugebauer, 1981
Прогноз 7	11/78-07/79	$4.2 \pm 2.8$	[21] Ермолаев, 1986
		* $3.0 \pm 1.2$	[68] Avakov et al., 1987
		$4.3 \pm 2.8$	[32] Ермолаев и др., 1988
		** $2.7 \pm 1.7$	

\* - за фронтом межпланетных ударных волн

\*\* - при температуре  $T_p \geq 3 \cdot 10^5$  K

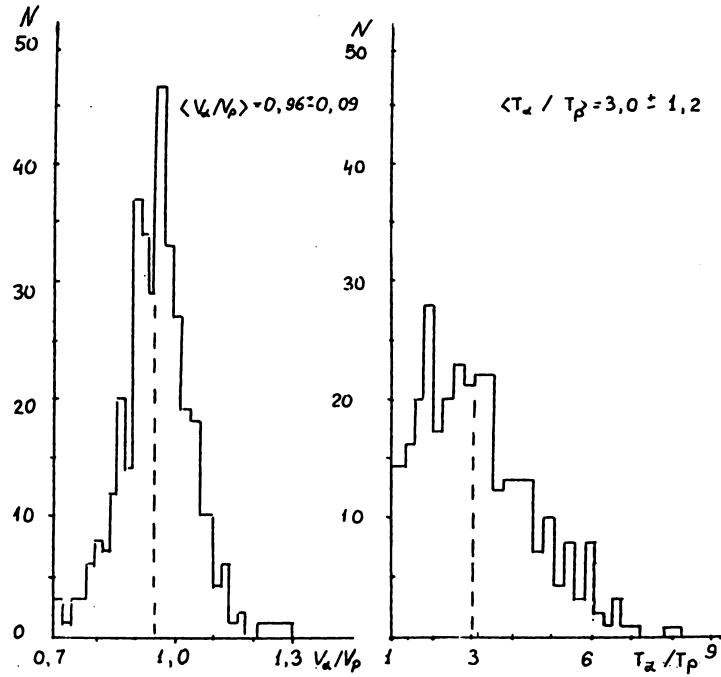


Рис. 3.9: Гистограммы распределения отношения скоростей  $v_\alpha/v_p$  и температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов в горячем солнечном ветре ( $T_p > 3 \cdot 10^5$  K) за фронтом межпланетных ударных волн по данным спутника *Прогноз 7* [68, Avakov et al., 1987].

солнечного ветра (без селекции по отдельным событиям): (1) для всех данных, (2) для  $T_p \sim 2 \cdot 10^5$  K и (3) для  $T_p > 3 \cdot 10^5$  K. С увеличением температуры распределения  $v_\alpha/v_p$  и  $T_\alpha/T_p$  смещаются в сторону меньших значений, при этом средние значения отношения скоростей меняются от  $1.007 \pm 0.054$  до  $0.998 \pm 0.076$  и отношения температур – от  $5.0 \pm 3.8$  до  $2.7 \pm 1.9$  (интервалы усреднения  $T_\alpha/T_p$  не ограничивались). Сравнивая с упомянутыми выше средними величинами, полученными для 14 событий в горячем солнечном ветре, можно сделать вывод, что добавление значений, полученных в горячем солнечном ветре и не связанных с межпланетными ударными волнами, приводит к более слабому уменьшению отношения скоростей  $v_\alpha/v_p$  и более сильному уменьшению отношения температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов. Возможно, это связано с тем, что в горячем солнечном ветре действуют механизмы, стремящиеся сравнять переносные скорости и кинетические температуры обеих ионных компонент.

Аналогичным образом изучалось поведение относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  в горячем солнечном ветре. На Рис. 3.12 показаны гистограммы  $n_\alpha/n_p$  для различных условий в солнечном ветре, которые свидетельствуют, что увеличение температуры протонной компоненты солнечного ветра приводит к уменьшению ширины и смещению максимума гистограммы в



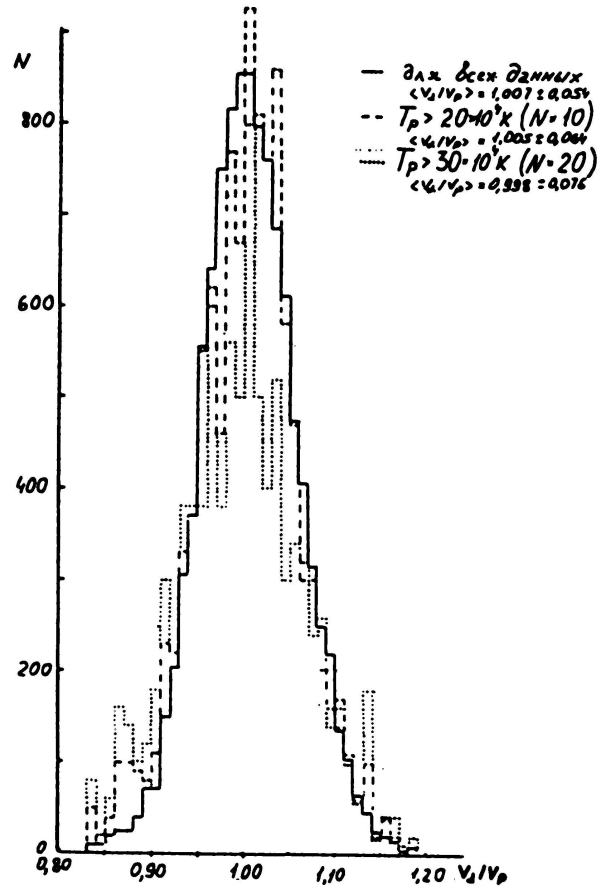


Рис. 3.10: Гистограммы распределения отношения скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha/v_p$  при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 1,007 \pm 0,054$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 10 раз) -  $T_p > 2 \cdot 10^5 K$  ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 1,005 \pm 0,054$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 20 раз) -  $T_p > 3 \cdot 10^5 K$  ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 0,998 \pm 0,076$ ) по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988].

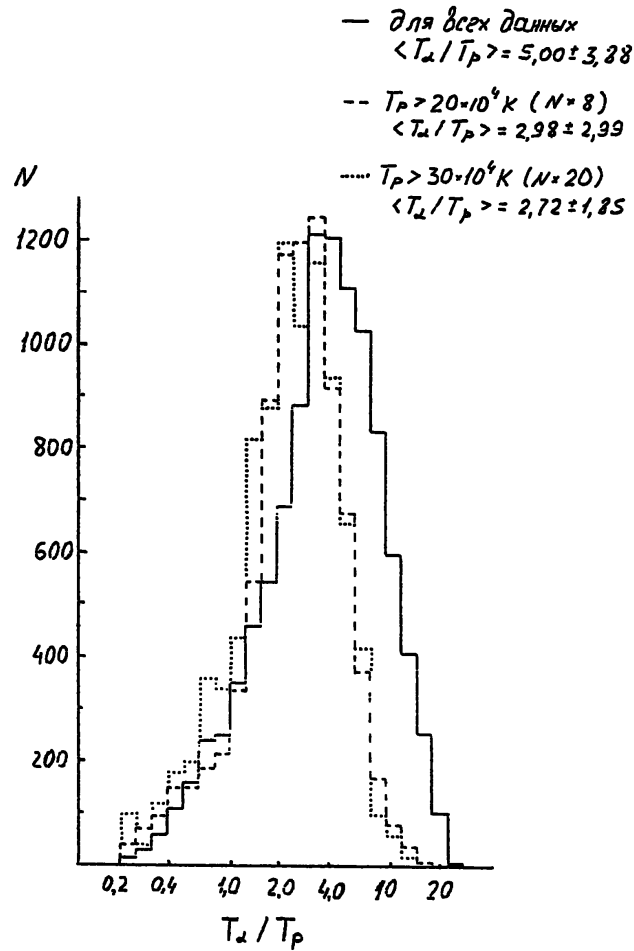


Рис. 3.11: Гистограммы распределения отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 5,00 \pm 3,88$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 8 раз) -  $T_p > 2 \cdot 10^5 \text{ K}$  ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 2,98 \pm 2,99$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 20 раз) -  $T_p > 3 \cdot 10^5 \text{ K}$  ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 2,72 \pm 1,85$ ) по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]. Усреднение проводилось по всему диапазону значений  $T_\alpha/T_p$ .

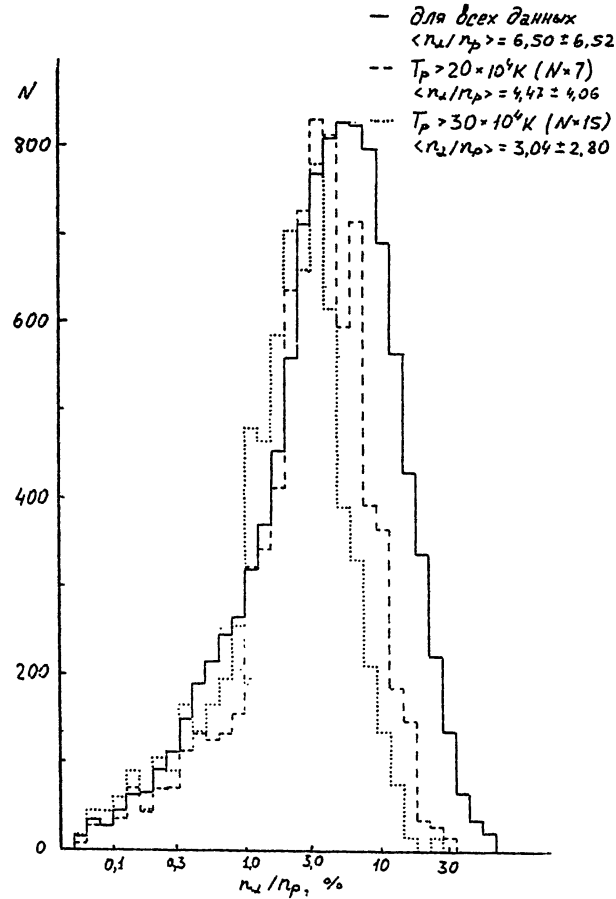


Рис. 3.12: Гистограммы распределения относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_{\alpha}/n_p$  при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle n_{\alpha}/n_p \rangle = 6,50 \pm 6,52$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 7 раз) -  $T_p > 2 \cdot 10^5 K$  ( $\langle n_{\alpha}/n_p \rangle = 4,47 \pm 4,05$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 15 раз) -  $T_p > 3 \cdot 10^5 K$  ( $\langle n_{\alpha}/n_p \rangle = 3,04 \pm 2,80$ ) по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]. Усреднение проводилось по всему диапазону значений  $n_{\alpha}/n_p$ .

сторону низких значений. Уменьшение ширины гистограммы может быть связано с увеличением тепловой ширины потоков обеих компонент, что повышает точность оценок величины  $n_{\alpha}/n_p$ . Уменьшение среднего значения относительной концентрации  $\alpha$ -частиц с ростом температуры солнечного ветра от  $6.5 \pm 6.5\%$  до  $3.0 \pm 2.8\%$  (интервал усреднения не ограничивался) не согласуется с косвенной оценкой зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц от температуры [185, Ogilvie, 1972]. Зависимость, полученная непосредственно по данным спутника *Прогноз 7*, по-видимому, отражает реальное поведение параметров и может быть связана с тем, что горячие потоки солнечного ветра берут свое начало из обедненных гелием областей солнечной короны.

### 3.3 Зависимость температуры и концентрации протонов от скорости и потока импульса

Изучение связей между различными гидродинамическими параметрами солнечного ветра дает ценную информацию о физических процессах, действующих при формировании и дальнейшей динамике течений межпланетной плазмы. По данным, полученным на спутнике *Прогноз 7*, такой анализ был выполнен путем вычисления средних значений ряда параметров, отселектированных по узким интервалам изменений другого параметра, и путем построения двумерных гистограмм [21, Ермолаев, 1986].

Зависимости температуры протонов  $T_p$  и концентрации ионов  $n$  солнечного ветра от его скорости  $v_p$  показаны на Рис. 3.13 и 3.14. Данные представлены в виде линии постоянного уровня на плоскостях, соответственно,  $\lg T_p - v_p$  и  $\lg n - v_p$ , где элементарные ячейки имеют размеры  $\Delta v_p = v_p^{i+1} - v_p^i = 10$  км/с и  $T_p^{i+1}/T_p^i = n^{i+1}/n^i = 1.25$ . На этих и последующих рисунках линии постоянного уровня имеют следующее обозначение: точки - число значений, попавших в элементарную ячейку,  $\geq 3$ , штрих -  $\geq 10$ , штрих с точкой -  $\geq 30$  и сплошная линия -  $\geq 100$ . Кружками на этих рисунках показаны средние величины функций в элементарном интервале по параметру, являющемуся аргументом. На этих и некоторых других рисунках представлены также соответствующие зависимости в виде двумерных гистограмм, на которых число значений, попавших в элементарную ячейку, показано окраской в соответствии с постоянной шкалой, приведенной на Рис. 3.17.

Как следует из Рис. 3.13, средняя температура протонов монотонно возрастает с увеличением скорости солнечного ветра. Следует отметить значительный разброс значений: имеется достаточно большое число наблюдений, когда значение температуры в  $\sim 3$  раза отличается от среднего. Интересно, что в области высоких скоростей (550-650 км/с) часто наблюдаются течения со сравнительно низкими температурами ( $\sim 3 \cdot 10^4$  К). Для сопоставления с результатами более ранних экспериментов данные Рис. 3.13 были аппроксимированы двумя видами функциональных зависимостей, и в результате были получены приближенные соотношения вида  $\lg T_p [^\circ \text{K}] = (2.38 \pm 0.18) \times \lg v_p [\text{км/с}] - (1.61 \pm 0.10)$  и  $T_p^{1/2} [10^3 \text{K}] = (0.027 \pm 0.003) \times v_p [\text{км/с}] - (2.64 \pm 0.21)$ , которые показаны на Рис. 3.15. Эти соотношения хорошо согласуются с результатами, полученными ранее на космических аппаратах *Vela 3*, *Explorer 34* и *43*, *Pioneer 6*, *Helios 1* и некоторых других (см. Табл. 3.6) и подтверждают вывод о том, что тепловая энергия потока солнечного ветра возрастает быстрее кинетической энергии.

Как и на предыдущем рисунке, на Рис. 3.14 наблюдается большой разброс значений ( $> 3$  раз) концентрации  $n$  относительно средних значений, тем не менее, можно выделить 3 области. В основной части, в виде огурца, концентрация  $n$  монотонно спадает от  $\sim 20 \text{ см}^{-3}$  при  $v_p \sim 300$  км/с до  $\sim 2 \text{ см}^{-3}$  при  $v_p \sim 650$  км/с, при этом к основной части примыкают еще две части:

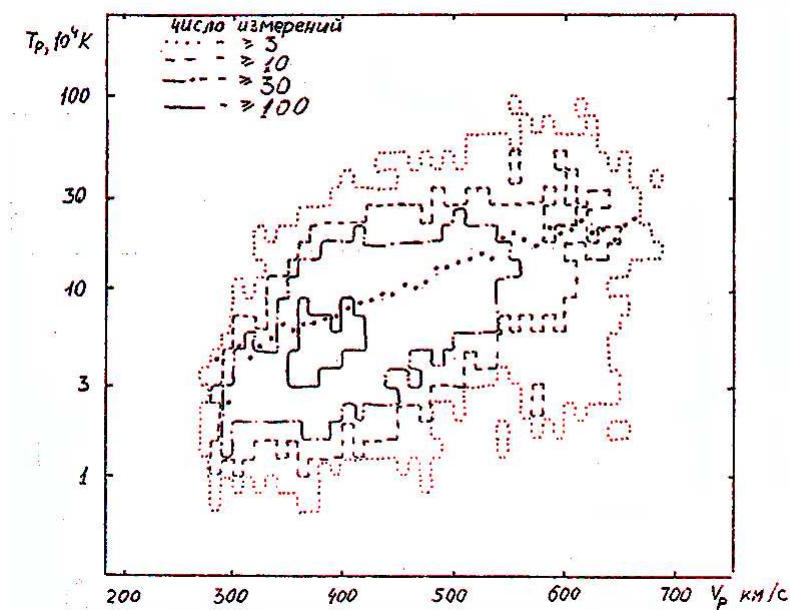
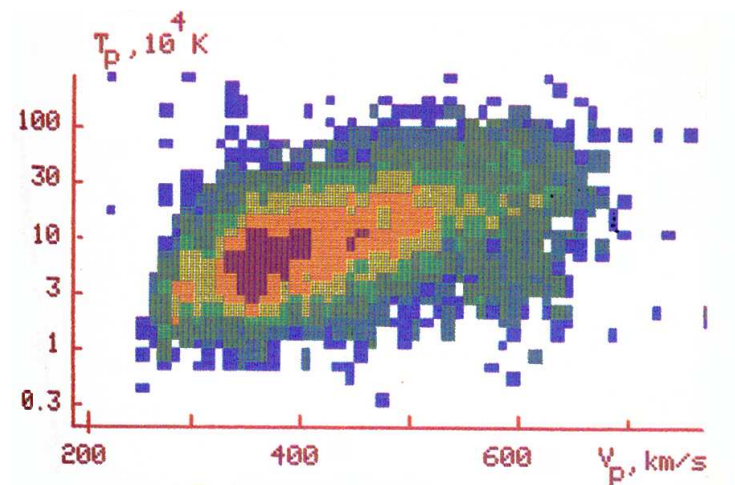


Рис. 3.13: Двумерная гистограмма зависимости кинетической температуры протонов солнечного ветра  $T_p$  от их переносной скорости  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [21, 23, 32, Ермолаев, 1986, 1988; Ермолаев и др., 1988].

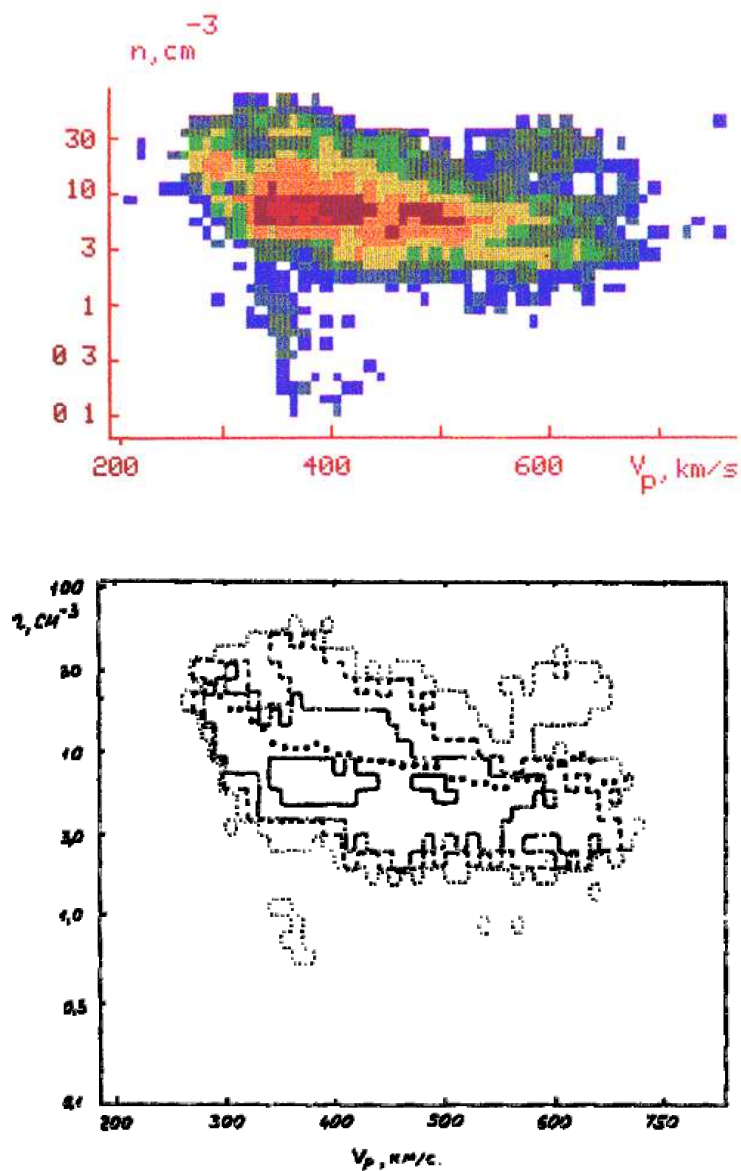


Рис. 3.14: Двумерная гистограмма зависимости концентрации ионов солнечного ветра  $n$  от переносной скорости протонов  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [21, 23, 32, Ермолаев, 1986, 1988; Ермолаев и др., 1988].

в области высоких скоростей  $v_p > 650$  км/с наблюдается плотная плазма с  $n > 10$  см<sup>-3</sup>, а в области низких скоростей  $v_p \sim 300-400$  км/с - разреженная плазма с  $n \sim 0.1 - 1.0$  см<sup>-3</sup>. Происхождение разных типов плазмы будет обсуждаться в главе 4.

Результаты аппроксимации данных на Рис.3.14 могут быть представлены в виде  $\lg n[\text{см}^{-3}] = (-1.4 \pm 0.5) \lg v_p[\text{км/с}] + (4.4 \pm 0.1)$ , при этом в интервале скоростей  $v_p < 550$  км/с наилучшая аппроксимация достигается при  $n \sim v_p^{-2.0 \pm 0.3}$ , а в интервале  $v_p > 550$  км/с - при  $n \sim v_p^{-0.8 \pm 1.0}$  (см. Рис. 3.15). Ранее в литературе приводились данные, свидетельствующие о сохранении в солнечном ветре при фиксированном гелиоцентрическом расстоянии величины потока импульса  $nv_p^2$  (или  $n \sim v_p^{-2}$ ) [233, 232, 168, Steinitz and Eyni, 1980; Steinitz, 1983; Mullan, 1983] (см. Табл. 3.7). В то же время на примере 22 событий было показано, что в течениях, связанных с корональными стримерами, зависимость концентрации ионов от скорости солнечного ветра более крутая  $n \sim v_p^{-3.257 \pm 0.428}$  [213, Sastri, 1987]. Данные спутника *Прогноз 7* показывают, что величина  $nv^2$  в среднем сохраняется для скоростей солнечного ветра от  $\sim 270$  до  $\sim 500$  км/с, а дальше увеличивается с ростом скорости за счет более медленного уменьшения концентрации [22, Ермолаев, 1987].

Данные Рис. 3.13 и 3.14 позволяют для каждого элементарного интервала скоростей поставить в соответствие температуру  $T_p$  и величину потока импульса  $nv_p^2$ . Полученная таким образом зависимость  $T_p$  от  $nv_p^2$  представлена на Рис. 3.16, где точки соответствуют скоростям  $< 400$  км/с, крестики -  $400 \text{ км/с} \leq v_p \leq 550$  км/с и кружки  $> 550$  км/с. Как уже отмечалось выше, при увеличении скорости солнечного ветра в диапазоне  $v_p < 550$  км/с температура возрастает при практически неизменной величине  $nv_p^2$  ( $T_p$  возрастает в  $\sim 10$  раз, в то время как вариации  $nv_p^2$  составляют не более 20%), а при дальнейшем росте скорости температура продолжает возрастать с одновременным увеличением величины потока импульса. Такое поведение температуры при изменении величины потока импульса в солнечном ветре качественно согласуется с сообщениями [164, 162, Lopez et al., 1986; Lopez, 1987], где по измерениям на КА *Helios* и *IMP 8* были получены указания на то, что в области значений  $v_p > 600$  км/с температура  $T_p$  возрастает с увеличением потока импульса  $nv_p^2$ , в области  $v_p < 400$  км/с температура или не зависит, или имеет слабую тенденцию к уменьшению при увеличении потока импульса. Как следует из данных спутника *Прогноз 7*, последний факт может быть следствием более слабой зависимости концентрации солнечного ветра от его скорости в высокоскоростных течениях, чем в низкоскоростных, что приводит к возрастанию потока импульса  $nv_p^2$  в быстрых течениях солнечного ветра [22, 32, Ермолаев, 1987; Ермолаев и др., 1988].

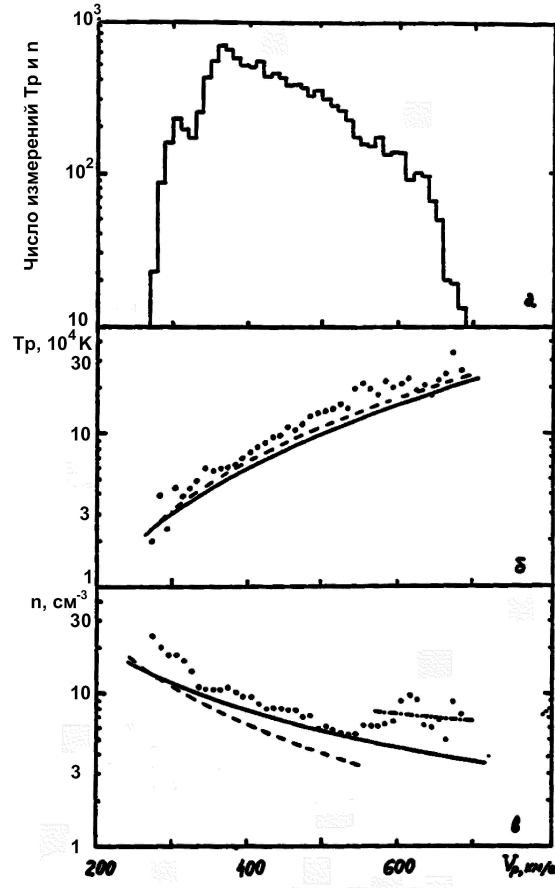


Рис. 3.15: Зависимость кинетической температуры протонов  $T_p$  и концентрации ионов  $n$  солнечного ветра от его скорости  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [22, Ермолаев]: а) число измерений  $T_p$  и  $n$  в интервалах усреднения  $\Delta v_p = 10$  км/с; б) точки - средние значения температуры; результаты аппроксимации: сплошная линия -  $\lg T_p = (2,38 \pm 0,18)\lg v_p - (1,61 \pm 0,10)$ , штриховая линия -  $T_p^{1/2} = (0,027 \pm 0,003)v_p - (2,64 \pm 0,21)$ ; в) точки - средние значения концентрации; результаты аппроксимации: сплошная линия -  $\lg n = -(1,4 \pm 0,5)\lg v_p + (4,4 \pm 0,1)$ , штриховая линия (в интервале скоростей  $v_p < 550$  км/с) -  $n \propto v_p^{-2,0 \pm 0,3}$ , линия штрих с точкой (в интервале скоростей  $v_p > 550$  км/с) -  $n \propto v_p^{-0,8 \pm 1,0}$ .



Таблица 3.6: Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости температуры протонов солнечного ветра от скорости и/или плотности кинитической энергии, а также от гелиоцентрического расстояния

Космич. аппарат	Период месяц/год	Вид аппроксим.	Кэфф. аппроксим.		Источник информации	Примечание
			A	B		
Vela 3	07/65-12/67	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.0313	-3.89	[203] Pizzo et al. 1973	
Explorer 34	06/67-12/67	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.036±0.004	-5.6±1.6	[88] Burlaga & Ogilvie, 1970	
Explorer 43	03/71-04/71	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.033±0.001	-4.8±0.4	[90] Burlaga & Ogilvie, 1973	
Pioneer 6	12/65-05/66	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.032±0.003	-3.3±0.4	[172] Neugebauer 1976	спокойный ветер
9 разных КА	11/65-05/72	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.024±0.003	-1.2±1.6	[100] Einy & Steinitz, 1977	
Mariner 2	08/62-12/62	$T \sim v^B$	—	2	[102] Einy & Steinitz, 1978a	
Mariner 2	08/62-12/62	$T \sim v^B$	—	2	[103] Einy & Steinitz, 1978b	
Helios 1 2	12/74-04/75	$T \sim r^A$	-(1.3 - 1.8)	—	[104] Einy & Steinitz, 1981	r=0.7-1.0 ae
Helios 1	12/74-04/75	$T \sim v^B$	—	2		r=0.3-1.0 ae
Mariner 2	08/62-12/62	$T \sim r^A v^B$	-0.57	2.19		r=1.3-6.4 ae
Pioneer 10	??/72-??/74		-1.01	2.55		
			-0.99	2.59		
ISEE 3	08/78-02/80	$T = A * v^B$	10 <sup>-1.90</sup>	2.608	[168] Mullan 1983	
Прогноз 7	11/78-06/79	$T \sim v^B$	—	2.5±0.2	[21] Ермолаев 1986	среднечас.
Helios 1	12/74-??/80	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.0331±0.002	-4.39±0.08	[163] Lopez & Freeman, 1986	v < 500 км/с
			0.0218±0.005	0.44±0.299		v > 500 км/с
		$T = A * v^B$	(2.46 ± 0.3)10 <sup>-7</sup>	3.22±0.02		v < 500 км/с
			(1.22 ± 0.4)10 <sup>-3</sup>	1.85 ± 0.05		v > 500 км/с
		$T = A * v + B$	0.504±0.004	-128.4±1.6		v < 500 км/с
			0.77±0.021	-265.2±12.5		v > 500 км/с
Helios 1	12/74-??/80	$T = A(nv^2)^B$			[164] Lopez et al., 1986	v < 500 км/с
			122±19	-0.06±0.012		dv/dt > 0
			390±55	-0.15±0.011		dv/dt < 0
			208±11	-0.10±0.005		любое
			5.8±1.1	0.24±0.017		v < 500 км/с
			27±6	0.12±0.015		dv/dt > 0
			0.14±0.03	0.51±0.01		dv/dt < 0
Разные КА	11/65-09/80	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.022±0.003	-2.25±0.96	[213] Sastri 1987	любое
		$T = A(nv^2) + B$	-(5.21±2.3)10 <sup>-6</sup>	41.1±3.8		стримеры
		$T = A(nv^2)^B$	1052±3.8	-0.256±0.095		стримеры
IMP 8	08/84-04/85	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.031±0.002	-5.1±0.7	[162] Lopez 1987	v < 500 км/с
			0.020±0.002	0.5±1.2		v > 500 км/с
		$T = A * v + B$	0.51±0.06	-142±39		v > 500 км/с
		$T = A * v^B$	(3±2)10 <sup>-4</sup>	2.05±0.17		v > 500 км/с
		$T = A(nv^2) + B$	(6.8±0.7)10 <sup>-5</sup>	34±15		v > 600 км/с
		$T = A(nv^2)^B$	(8±4)10 <sup>-4</sup>	0.84±0.08		v > 600 км/с
		$T = A * e^{Bnv^2}$	72±5	(3.9±0.35)10 <sup>-7</sup>		v > 600 км/с
Прогноз 7	11/78-06/79	$\sqrt{T} = A * v + B$	0.025±0.003	-1.99±0.19	[22] Ермолаев 1987	среднечас.
			0.027±0.003	-2.64±0.21	[32] Ермолаев и др., 1988	4-минутные
		$T = A * v^B$	10 <sup>-1.61±0.10</sup>	2.38±0.18		

Примечание. Температура выражается при корневой зависимости в 10<sup>3</sup>К, при степенной – в °К, скорость – в км/с, концентрация – в см<sup>-3</sup>.

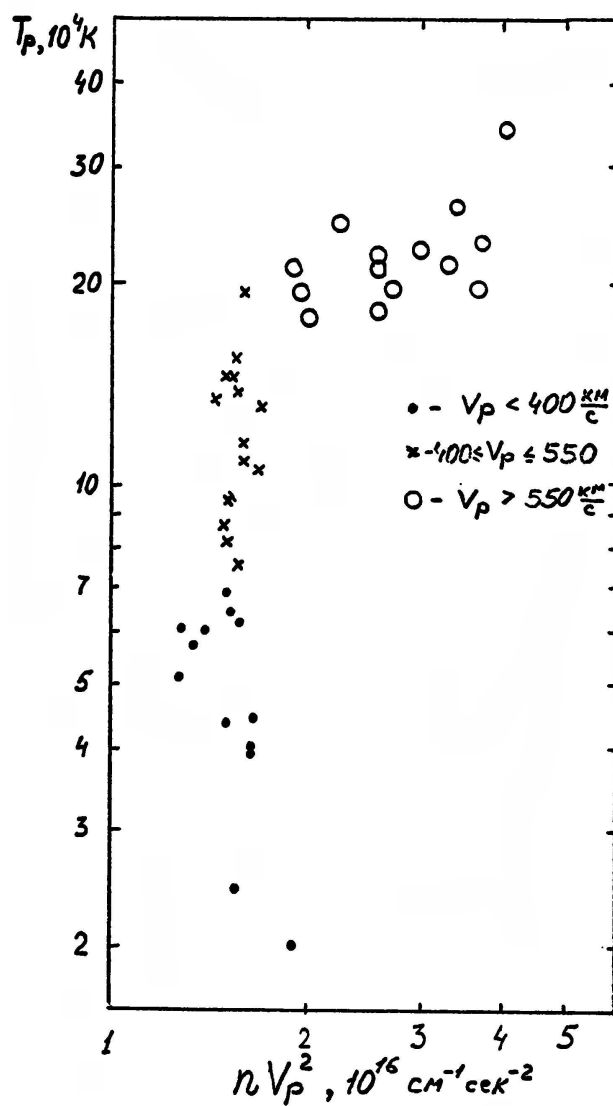


Рис. 3.16: Зависимость кинетической температуры протонов  $T_p$  солнечного ветра от его потока импульса  $n v_p^2$  по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]: представлены результаты усреднения  $T_p$  и  $n v_p^2$  по интервалам скорости  $\Delta v_p = 10$  км/с в трех диапазонах скоростей: точки -  $v_p < 400$  км/с, крестики -  $400 < v_p < 550$  км/с, кружки -  $v_p > 550$  км/с.

Таблица 3.7: Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости концентрации солнечного ветра от скорости и гелиоцентрического расстояния

Космич. аппарат	Период месяц/год	Вид аппроксим.	Коэфф. аппроксим.		Источник информации	Примечание
			A	B		
Explorer 34	06/67-12/67	$n \sim v^B$	–	-1.5	[89] Burlaga & Ogilvie, 1970b	
Vela	07/65-12/67	$n = A * v^{-1.5} + B$	$3.26 * 10^4$	2.86	[203] Pizzo et al., 1973	
9 разных КА	11/65-05/72	$n \sim v^B$	–	$-2.13 \pm 0.31$	[172] Neugebauer, 1976	спокойный ветер
Mariner 2	08/62-12/62	$n \sim v^B$	–	-3	[100] Eyni & Steinits, 1977	
Vela 3	07/65-12/67	$n(r/R)^2 = A * v^B$	$10^{6.56}$	-2.20	[233] Steinits & Eyni, 1980	$r=0.7-1.0$ а.е.
Mariner 2	08/62-12/62		$10^{6.05}$	-1.99		$r=0.3-1.7$ а.е.
Helios 1	12/74-04/75		$10^{5.31}$	-1.71		$r=0.7-1.0$ а.е.
Helios 2	01/76-05/76		-1.92	-1.98		
ISEE 3	08/78-02/80	$n = A * V^B$	$10^{6.112}$	-2.045	[232] Steinits, 1983	
Прогноз 7	11/78-06/79	$n \sim v^B$	–	$-1.8 \pm 0.5$	[21] Ермолаев, 1986	среднечасов.
			–	-2.0		$v < 500$ км/с
			–	-0.8		$v > 500$ км/с
Прогноз 7	11/78-06/79	$n = A * v^B$	$10^{4.4 \pm 0.1}$	$-1.4 \pm 0.5$	[22] Ермолаев, 1987	4-минутные
			–	$-2.0 \pm 0.3$		$v < 500$ км/с
			–	$-0.8 \pm 1.0$		$v > 500$ км/с
разные КА	11/65-09/80	$n = A * v^B$	$10^{9.306 \pm 1.09}$	$-3.257 \pm 0.428$	[213] Sastri, 1987	стримеры

### 3.4 Зависимость содержания гелия от скорости и величины потока

Скорость солнечного ветра  $v_p$ , изменяясь в малых (по сравнению с другими параметрами) пределах, может быть использована для идентификации типа солнечного ветра. Поэтому полученные данные об относительной концентрации  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  часто представляют в виде функции от скорости солнечного ветра. На Рис. 3.17 представлена двумерная гистограмма зависимости  $n_\alpha/n_p$  от скорости  $v_p$ , при этом элементарная ячейка на плоскости  $\lg n_\alpha/n_p - v_p$  имеет размеры  $\Delta v_p = 10$  км/с и  $(n_\alpha/n_p)^{i+1}/(n_\alpha/n_p)^i = 1.25$ . Средние значения относительного содержания  $\alpha$ -частиц на этом рисунке получены путем усреднения по всему интервалу значений параметра  $n_\alpha/n_p$ , и поэтому они несколько завышены (на - 30-40%, см. раздел 2.4). В интервале скоростей солнечного ветра 300-400 км/с относительное содержание  $\alpha$ -частиц растет с увеличением скорости от  $\sim 2$  до  $\sim 8\%$  (с учетом завышения от  $\sim 1.5$  до  $\sim 5.5\%$ ), и при дальнейшем увеличении скорости оно сохраняется в диапазоне от  $\sim 8$  до  $\sim 10\%$  (с учетом завышения от  $\sim 5.5$  до  $\sim 6.0$ ). Некоторое уменьшение средней величины  $n_\alpha/n_p$  наблюдается в области высоких скоростей (550-620 км/с), и хотя в этом диапазоне скоростей имеется сравнительно небольшое число наблюдений, это уменьшение  $n_\alpha/n_p$ , по-видимому, реально, и его возможные причины будут обсуждены в конце раздела 3.5 и в главе 5 настоящей работы.

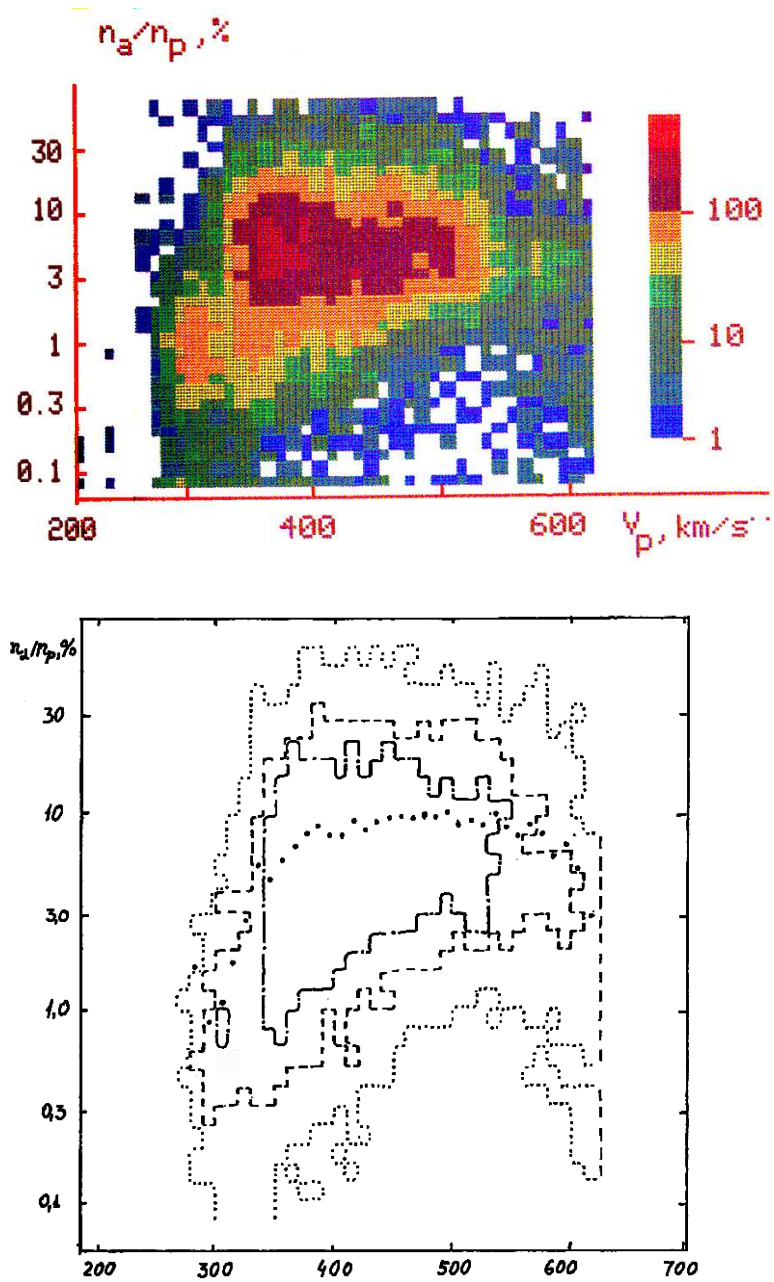


Рис. 3.17: Двумерная гистограмма зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 32, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1988].

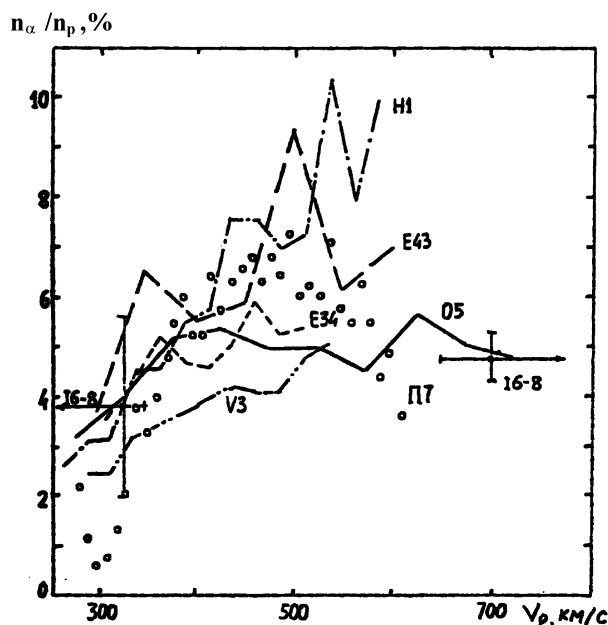


Рис. 3.18: Средняя зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутников *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34* и *43* [185, Ogilvie, 1972], *HEOS 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *IMP 6-8* [74, Bame et al., 1977], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* [23, Ермолаев, 1988].

Аппроксимация данных Рис. 3.17 дает следующую зависимость параметров  $\lg n_\alpha/n_p[\%] = (2.1 \pm 0.3) \times \lg v_p [\text{км/с}] - (4.95 \pm 0.17)$ , т.е. полученная по данным спутника *Прогноз 7* зависимость оказывается более крутой, чем использованная ранее линейная зависимость [188, Ogilvie and Hirshberg, 1974] (см. Табл. 3.8). На Рис. 3.18 показаны аналогичные зависимости, полученные по измерениям на спутниках *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34* и *43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *IMP 6-8* [74, Bame et al., 1977], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* (с учетом завышения). Полученная по данным спутника *Прогноз 7* зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра хорошо согласуется с полученными ранее результатами в диапазоне скоростей  $v_p < 550$  км/с и свидетельствует о возрастании содержания гелия при возрастании скорости солнечного ветра в этом диапазоне.

Одним из возможных эффектов, влияющих на выход тяжелых ионов из солнечной короны в межпланетное пространство, является их кулоновское трение с основной, протонной, компонентой плазмы. В частности, в работе [121, Geiss, 1970] на основе теоретических расчетов было предположено, что существует такой минимальный порог потока плазмы, выше которого ионы более тяжелые, чем протоны, эффективно выходят в межпланетное пространство за счет кулоновского трения. На Рис. 3.19 показана зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока ионов солнечного ветра  $nv_p$  (средние значения  $n_\alpha/n_p$  на этом рисунке определялись

Таблица 3.8: Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости относительной концентрации  $\alpha$ -частиц солнечного ветра от скорости, величины потока и температуры.

Космич. аппарат	Период месяц/год	Вид аппроксим.	Коэфф. аппроксим.		Источник информации	Примеч.
			A	B		
Vela 3	07/65-07/67	$n_\alpha/n_p = Av + B$	$1.02 \pm 0.03$	$-0.39 \pm 0.14$	[137] Hirshberg et al., 1972b	
Explorer 34	05/67-01/68	$n_\alpha/n_p = Av + B$	1.08	2.2	[185] Ogilvie,	
Explorer 43	03/71-04/71		0.90	1.37	1972	
Vela 3	07/65-07/67	$n_\alpha/n_p = AT^{1/2} + B$	0.28	—		по 3 ИСЗ
Explorer 34	05/67-01/68					
Explorer 43	03/71-04/71					
Heos 1	12/68-04/70	$n_\alpha/n_p = Av + B$	2.2	-3.25	[167] Moreno & Palmiotto, 1973	
Mariner 2	08/62-12/62	$n_\alpha/n_p = Av + B$	0.35	1.6	[188] Ogilvie &	*
Vela 3	07/65-03/66		0.8	0.2	Hirshberg, 1974	спокой. СВ
	03/66-07/67		1.2	-0.7		возмущ. СВ
OGO 5	03/68-04/69		2.1	-4.5		
Heos 1	12/68-04/70		2.2	-3.2		*
Explorer 43	03/71-04/71		1.4	1.4		*
Apollo 15	08/71-06/72		0.57	1.7		
Прогноз 7	11/78-06/79	$n_\alpha/n_p = Av^B$	$10^{-4.95 \pm 0.17}$	$2.1 \pm 0.3$	[23] Ермолаев,	
		$n_\alpha/n_p = A(nv)^B$	$10^{1.42 \pm 0.06}$	$-0.56 \pm 0.08$	1988	
		$n_\alpha/n_p = Anv + B$	$-0.037 \pm 0.007$	$6.68 \pm 0.16$		

Примечание.  $n_\alpha/n_p$  измеряется в %,  $v$  - в км/с,  $T$  - в °К и  $nv$  - в  $10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

\* - результаты получены с учетом особенностей функционирования аппаратуры и отличаются от полученных ранее.

без ограничения интервала усреднения и поэтому завышены на 30 - 40%). В диапазоне величины потока  $(0.5 - 3.0) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  средние значения  $n_\alpha/n_p$  меняются сравнительно мало с разбросом в диапазоне от 5.7 до 10.1% (с учетом поправки от  $\sim 4$  до  $\sim 7\%$ ). Средние значения  $n_\alpha/n_p$  при величине потока менее  $0.7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  имеют большую неопределенность из-за небольшой статистики случаев наблюдения. При росте потока в диапазоне свыше  $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  средние значения  $n_\alpha/n_p$  заметно уменьшаются от 9,2 до 3,0% (с учетом поправки от  $\sim 6$  до  $\sim 2\%$ ). Аппроксимация данных Рис. 3.19 дает следующие виды зависимостей:  $n_\alpha/n_p[\%] = -(0.037 \pm 0.007) \times nv_p[10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}] + (6.68 \pm 0.16)$  и  $\lg n_\alpha/n_p[\%] = -(0.56 \pm 0.08) \times \lg nv_p[10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}] + (1.42 \pm 0.06)$ .

Такое поведение относительного содержания  $\alpha$ -частиц в плотном солнечном ветре с  $nv_p = (3 - 5) \cdot 8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  совпадает с аналогичными результатами космических экспериментов *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34*, *43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] (см. Рис. 3.20, на котором кружками показаны данные Рис. 3.19 с учетом поправки), при этом данные спутника *Прогноз 7* позволяют проследить дальнейшее уменьшение относительной концентрации  $\alpha$ -частиц вплоть до потока  $18 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . В диапазоне величины потока  $(1 - 3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  наши данные качественно согласуются (наблюдается рост содержания гелия при увеличении величины потока) только с данными спутника *Explorer 34*. Таким образом, полученные данные являются достаточно

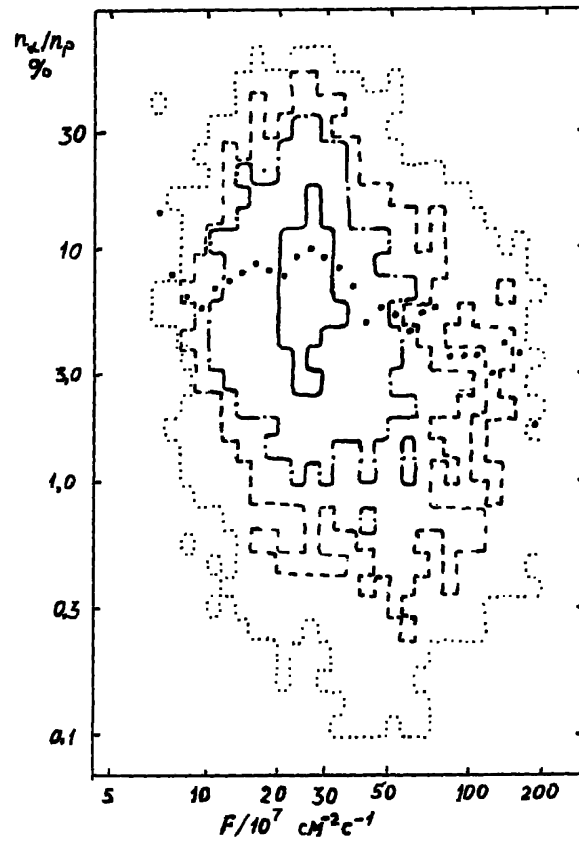


Рис. 3.19: Двумерная гистограмма зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, Ермолаев, 1988].

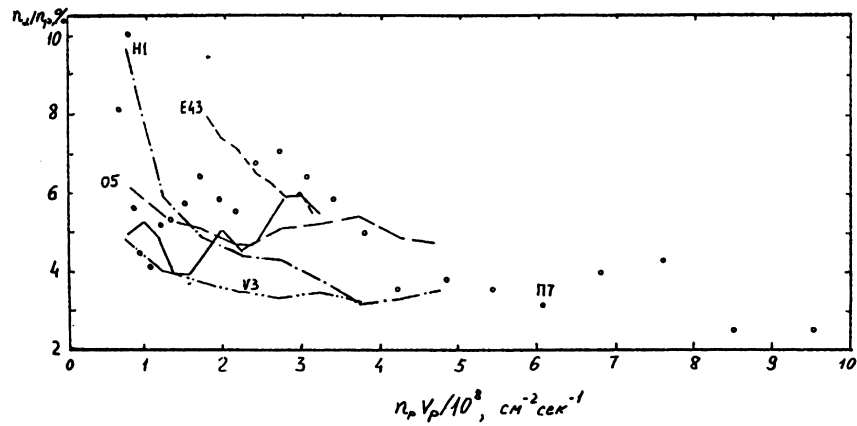


Рис. 3.20: Средняя зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$  по данным спутников *Vela 3* [136, Hirschberg et al., 1972], *Explorer 34, 43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* [23, 244, Ермолаев, 1988; Yermolaev, 1992].

противоречивыми и, по крайней мере, в области высоких потоков солнечного ветра не подтверждают гипотезу о влиянии кулоновского трения на выход тяжелых ионов в межпланетное пространство [121, Geiss, 1970]. Однако необходимо отметить, что прямая корреляция между величиной потока ионов на гелиоцентрическом расстоянии 1 а.е., на котором проводились эти измерения, и величиной потока в области формирования ионного состава солнечного ветра может отсутствовать.

### 3.5 Зависимость разности скоростей и отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов от скорости

Для получения информации о механизмах, ответственных за установление в солнечном ветре неравновесных состояний с  $v_\alpha > v_p$  и  $T_\alpha > T_p$  важно исследовать связь степени отклонения компонент от термодинамического равновесия и условий в солнечном ветре. Данные о зависимостях разности переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения кинетических температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов от скорости солнечного ветра  $v_p$ , полученные на спутнике *Прогноз 7* [21, 23, Ермолаев, 1986, 1988], представлены на Рис. 3.21 и 3.23.

Как видно из Рис. 3.21, скорость  $\alpha$ -частиц в медленных течениях солнечного ветра ( $v_p < 330$  км/с) в среднем меньше скорости протонов. В более быстрых течениях ( $330 \leq v_p \leq 520$  км/с) солнечного ветра скорость  $\alpha$ -частиц возрастает при увеличении скорости течения  $v_p$  и становится больше скорости протонов. Скорость  $\alpha$ -частиц вновь становится меньше скорости протонов при скоростях  $v_p > 550$  км/с, т.е. в течениях, в которых изменяется характер зависимостей концентрации ионов  $n$  и относительного содержания гелия  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра (см. разделы 3.3. и 3.4.). Однако следует отметить, что число наблюдений в высокоскоростном солнечном ветре ( $v_p > 550$  км/с) невелико, поэтому этот вывод требует дальнейшего изучения. Аппроксимация данных Рис. 3.21 дает следующую зависимость:  $v_\alpha - v_p [\text{км/с}] = (0.023 \pm 0.009) v_p [\text{км/с}] - (6.3 \pm 1.3)$ , которая оказывается менее крутой, чем полученная по данным спутников *IMP 6*, *7*,  $v_\alpha - v_p = 0.032 v_p - 12$  (для векторной разности  $|\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p| = 0.08 v_p - 23$ ) [65, Asbridge et al., 1976].

На Рис. 3.22 представлены данные о зависимости модуля разности векторов скорости  $\alpha$ -частиц и протонов  $|\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p|$  от скорости солнечного ветра  $v_p$ , полученные по данным спутников *IMP 6,7* [65, Asbridge et al., 1976], *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [193, Ogilvie et al., 1982]. На том же рисунке кружками показаны результаты селективных измерений разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов вдоль оси измерения прибора СКС-04 в интервалах скорости  $\Delta v_p = 10$  км/с. Несмотря на то, что физические величины, измеренные на спутнике *Прогноз 7* и других спутниках Рис. 3.22, отличаются друг от друга (они совпадают лишь тогда, когда вектор разности скоростей  $\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p$  близок к направлению



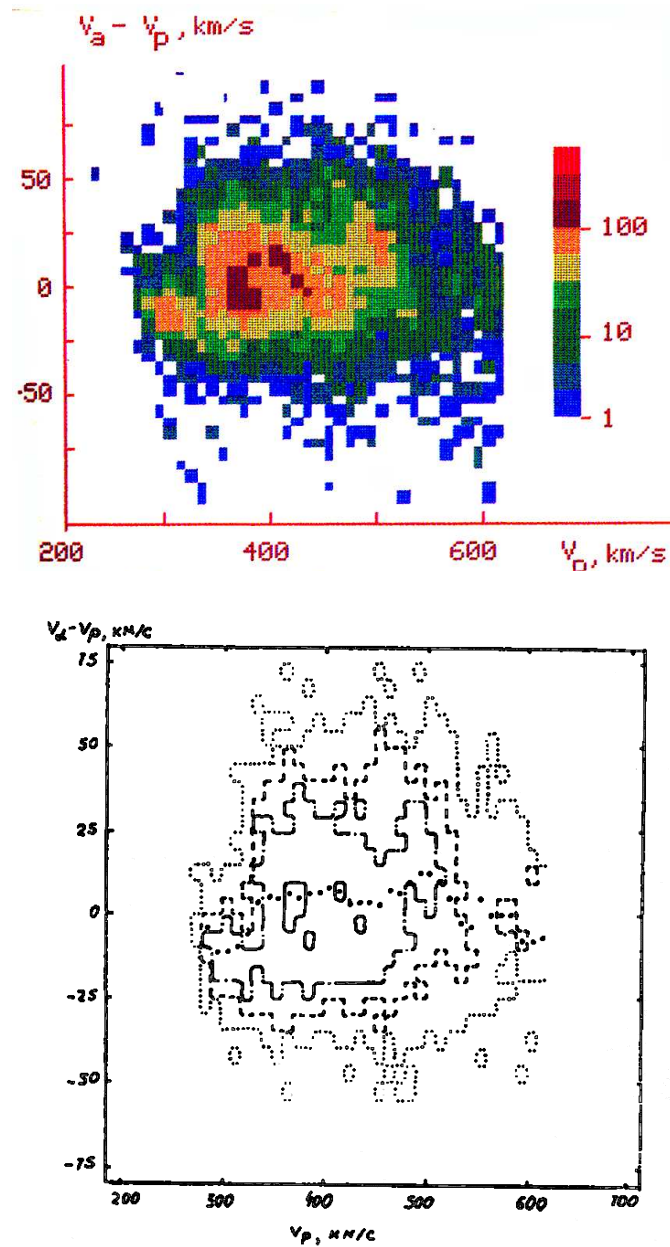


Рис. 3.21: Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [21, 23, Ермолаев, 1986, 1988] .

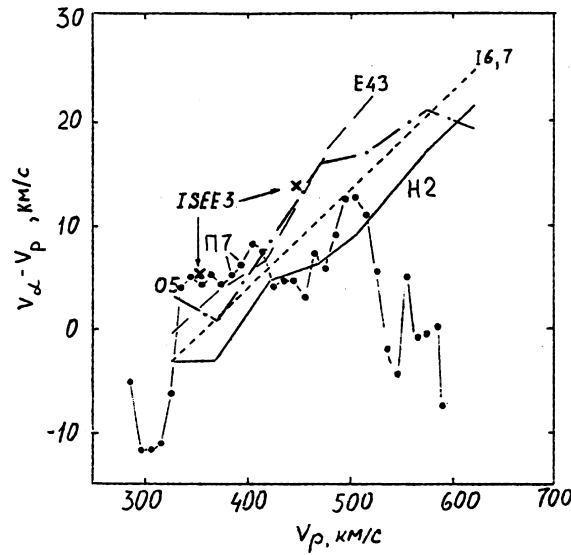


Рис. 3.22: Средняя зависимость разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутников *IMP 6,7* [65, Asbridge et al., 1976], *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [193, Ogilvie et al., 1982] и *Прогноз 7* [23, 25, Ермолаев, 1988, 1994].

Земля-Солнце), в низкоскоростном ветре ( $v_p < 520$  км/с) результаты всех экспериментов находятся в хорошем соответствии и показывают почти линейную зависимость разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов от скорости солнечного ветра. Однако в высокоскоростных течениях солнечного ветра ( $v_p > 520$  км/с) результаты измерений на спутнике *Прогноз 7* заметно отличаются от результатов других экспериментов. Возможно, обнаруженное по данным спутника *Прогноз 7* поведение  $v_\alpha - v_p$  в быстрых течениях реально и ранее не наблюдалось из-за методических трудностей измерения распределения  $\alpha$ -частиц в горячем солнечном ветре методами энергоанализа. Однако, необходимо учитывать, что, во-первых, в указанных экспериментах определялись несколько разные физические величины и, во-вторых, результаты спутника *Прогноз 7* в этом диапазоне скоростей имеют сравнительно небольшую статистику.

Похожая зависимость от скорости солнечного ветра наблюдается и для отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов (см. Рис. 3.23): в медленных течениях солнечного ветра ( $v_p \leq 330$  км/с) среднее отношение  $T_\alpha/T_p$  оказывается меньше 4, а в более быстрых течениях ( $v_p > 330$  км/с) среднее отношение  $T_\alpha/T_p$  наблюдается в диапазоне значений 4,6 - 6,3 (с учетом того, что усреднение по всему интервалу значений завышает среднее на 20%, среднее  $T_\alpha/T_p$  меняется в диапазоне  $\sim 3,5 - 5,0$ ). Аппроксимация данных Рис. 3.23 дает

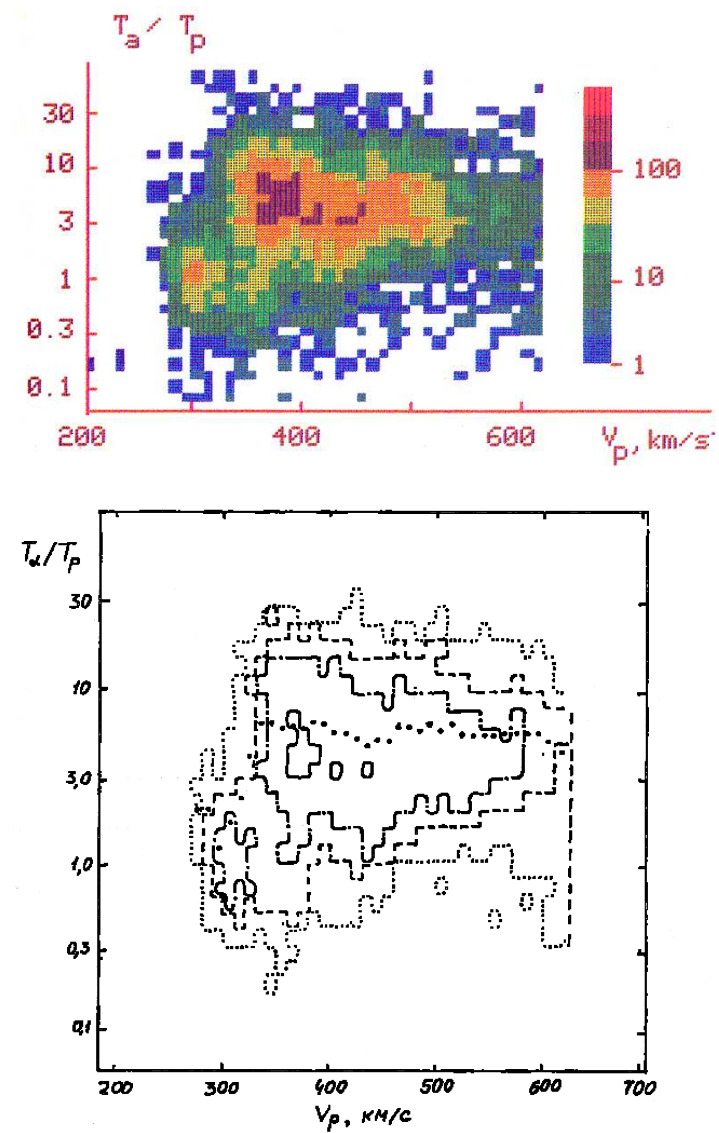


Рис. 3.23: Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [21, 23, Ермолаев, 1986, 1988].

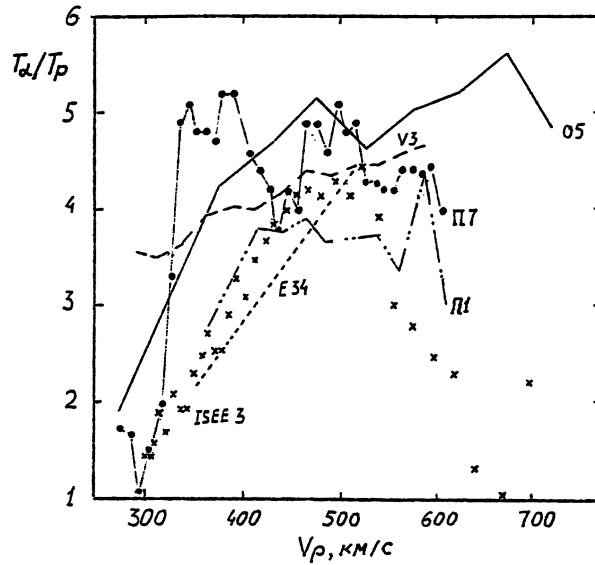


Рис. 3.24: Средняя зависимость отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутников *Vela 3* [111, Feynman, 1975], *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977], *Explorer 34*, *OGO 5* [82, Bollea et al., 1972], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* [23, 25, Ермолаев, 1988, 1994] .

зависимость  $\lg T_\alpha/T_p = (0.94 \pm 0.15) \lg v_p \text{ [км/с]} - (1.95 \pm 0.12)$ , т.е. зависимость близка к линейной.

Зависимости отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  для космических экспериментов на спутниках *Vela 3* [111, Feynman, 1975], *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977], *Explorer 34*, *OGO 5* [82, Bollea et al., 1972], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* (данные Рис. 3.23 с учетом завышения) представлены на Рис. 3.24. Результаты большинства экспериментов находятся в хорошем соответствии. Отличие результатов, полученных на спутнике *ISEE 3* в области высоких скоростей ( $v_p \geq 600$  км/с) солнечного ветра, от результатов других экспериментов, по-видимому, связано с методическим эффектом, возникающим при регистрации данных вблизи верхней границы диапазона измерений по скорости [21, Ермолаев и др., 1986].

На Рис. 3.25 суммированы данные о зависимостях кинетической температуры протонов  $T_p$ , концентрации ионов  $n$ , относительной концентрации гелия  $n_\alpha/n_p$ , отношение температур  $T_\alpha/T_p$  и разности скоростей  $v_\alpha - v_p$   $\alpha$ -частиц и протонов от скорости солнечного ветра  $v_p$ . На этом рисунке также представлено число отдельных измерений  $N$ , попавших в элементарный интервал скоростей  $\Delta v_p = 10$  км/с. Как отмечалось в разделе 3.3. (см. Рис. 3.15) и показано на верхней панели Рис. 3.25, при увеличении скорости солнечного ветра  $v_p$  кинетическая температура  $T_p$  в среднем возрастает по степенному

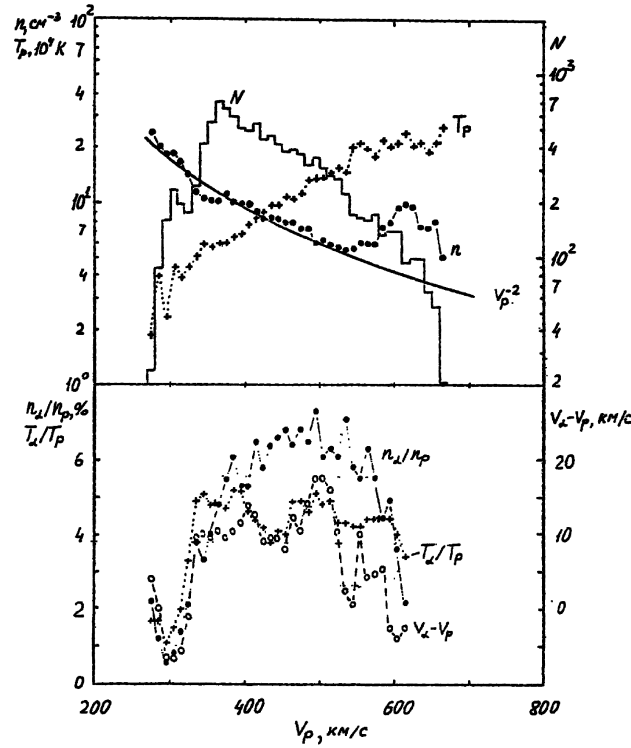


Рис. 3.25: Средние зависимости от скорости солнечного ветра  $v_p$  а) кинетической температуры протонов  $T_p$  и концентрации ионов  $n$ , а также числа измерений  $N$  в элементарном интервале по скорости  $\Delta v_p = 10$  км/с; б) относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$ , разности переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения кинетических температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов по данным спутника *Прогноз 7* [23, 249, Ермолаев, 1988; Yermolaev and Stupin, 1990].

закону  $v_p^{2.4 \pm 0.2}$ , а концентрация ионов  $n$  уменьшается таким образом, что поток импульса  $nv_p^2$  в медленном и среднем ( $v_p \leq 550$  км/с) солнечном ветре почти не изменяется, а в высокоскоростном - возрастает. Как отмечалось в разделе 3.4. (см. Рис. 3.18) и показано на нижней панели Рис. 3.25, относительная концентрация  $n_\alpha/n_p$ , отношение температур  $T_\alpha/T_p$  и разность скоростей  $v_\alpha - v_p$   $\alpha$ -частиц и протонов в медленном солнечном ветре ведут себя аналогично при возрастании скорости  $v_p$ : в диапазоне скоростей от  $\sim 270$  до  $\sim 300$  км/с все указанные параметры заметно уменьшаются (следует отметить, что статистика наблюдений в этом диапазоне не велика), в диапазоне от  $\sim 300$  до  $\sim 350$  км/с все эти параметры резко возрастают. При дальнейшем увеличении скорости рассматриваемые параметры ведут себя различным образом: величина  $T_\alpha/T_p$  сохраняется почти неизменной (от  $\sim 4$  до  $\sim 5$ ) вплоть до 620 км/с (верхней границы диапазона измерений параметров  $\alpha$ -частиц), а величины  $n_\alpha/n_p$  и  $v_\alpha - v_p$  сначала медленно растут до скорости  $\sim 520$  км/с, а затем начинают заметно снижаться.

Изменения температуры протонов  $T_p$  и отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  при изменении скорости солнечного ветра в целом согласуются с результатами других космических экспериментов (см. Табл. 3.5, 3.6 и Рис. 3.24). В ряде экспериментов отмечалось, что концентрация ионов  $n$  изменяется в

зависимости от скорости ветра по степенному закону с показателем близким к -2 во всем диапазоне скоростей (см. Табл. 3.7). Однако на фазе роста предыдущего цикла солнечной активности по данным спутника *Heos 1* наблюдалось увеличение концентрации ионов в высокоскоростном солнечном ветре [96, Diodato et al., 1974], похожее на результаты измерений на спутнике *Прогноз 7*. Согласно нашим данным в этом диапазоне скоростей с увеличением полной концентрации ионов наблюдается уменьшение относительного содержания  $\alpha$ -частиц. Таким образом, во всем диапазоне скоростей солнечного ветра знак разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов совпадает со знаком производной  $d(n_\alpha/n_p)/dv_p$ . Как было показано в работах [101, 13, Eyni and Steinitz, 1977; Веселовский, 1978], перемешивание разноскоростных течений с различным ионным составом может быть причиной наблюдаемого поведения разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов при повышении скорости солнечного ветра.

### 3.6 О причинах нарушения термодинамического равновесия между протонами и $\alpha$ -частицами

В литературе [65, 174, Asbridge et al., 1976; Neugebauer, 1981] приводятся данные, свидетельствующие о линейной зависимости модуля векторной разности массовых скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $|\vec{v}_\alpha - \vec{v}_p|$  и величины альвеновской скорости  $v_A$ , что позволило высказать гипотезу о связи преимущественного ускорения (и нагрева)  $\alpha$ -частиц с волновой активностью солнечного ветра (см. обзоры [174, 14, Neugebauer, 1981; Веселовский, 1984]). Поэтому представляют интерес полученные по данным спутника *Прогноз 7* [251, Yermolaev et al., 1990] зависимости разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от величины альвеновской скорости  $v_A$ , показанные на Рис. 3.26 и 3.27, соответственно.

Как видно на Рис. 3.26, средняя разность скоростей  $v_\alpha - v_p$  возрастает от отрицательных значений  $\sim -5$  км/с до положительных  $\sim +10$  км/с с увеличением альвеновской скорости от  $\sim 25$  до  $\sim 75$  км/с. При дальнейшем увеличении альвеновской скорости величина  $v_\alpha - v_p$  уменьшается, достигая значения  $\sim 0$  вблизи  $v_A \approx 100$  км/с. Результаты, полученные при значениях  $v_A \geq 100$  км/с, ненадежны из-за сравнительно небольшой статистики случаев наблюдения. Для альвеновской скорости в диапазоне от 0 до 75 км/с полученная по данным спутника *Прогноз 7* зависимость разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов от величины альвеновской скорости  $v_\alpha - v_p$  [км/с] =  $(0.26 \pm 0.13)v_A$  [км/с] -  $(9.5 \pm 1.1)$  оказывается менее крутой, чем полученная по измерениям в высокоскоростном течении с 30 марта по 2 апреля 1971 г. на спутнике *IMP 6*  $v_\alpha - v_p = v_A - 25$  [65, Asbridge et al., 1976]. По данным спутника *Прогноз 7* в диапазоне альвеновских скоростей от  $\sim 75$  до  $\sim 100$  км/с зависимость этих параметров является сильной обратной, поэтому при аппроксимации данных Рис. 3.26 во всем диапазоне альвеновских скоростей зависимость

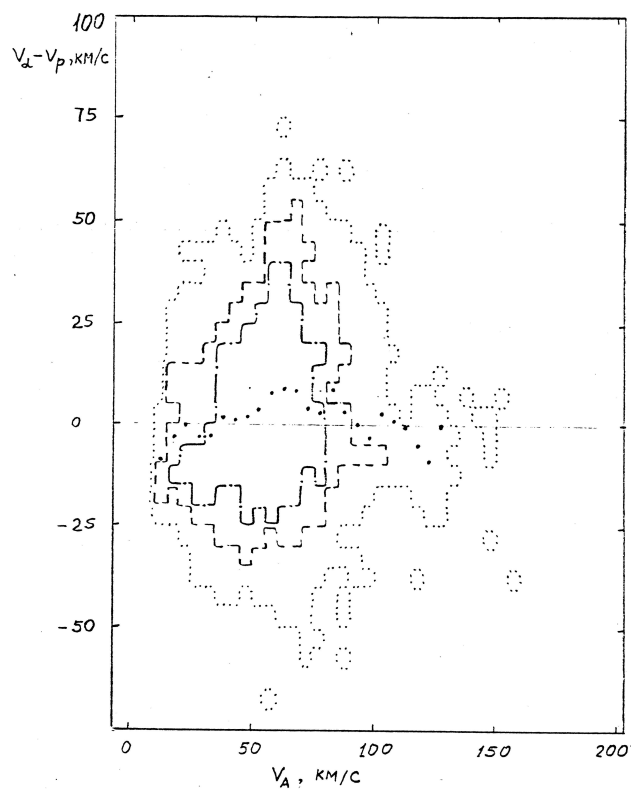


Рис. 3.26: Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от величины альвеновской скорости  $v_A$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 251, Ермолаев, 1988; Yermolaev et al., 1990].

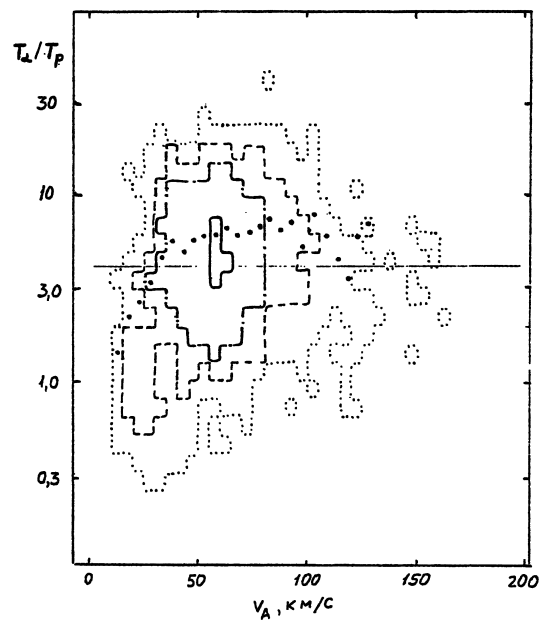


Рис. 3.27: Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от величины альвеновской скорости  $v_A$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 251, Ермолаев, 1988; Yermolaev et al., 1990].

оказывается слабой обратной:  $v_\alpha - v_p$  [км/с] =  $-(0.011 \pm 0.012) v_A$  [км/с] +  $(3.9 \pm 0.9)$ . По-видимому, корреляция параметров  $v_\alpha - v_p$  и  $v_A$  характерна лишь для некоторых специфических условий в солнечном ветре.

Изменение отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  с ростом альвеновской скорости  $v_A$  (см. Рис. 3.27) в основных чертах аналогично изменению  $v_\alpha - v_p$  на Рис. 3.26: при возрастании альвеновской скорости от  $\sim 25$  до  $\sim 75$  км/с средняя величина  $T_\alpha/T_p$  увеличивается от  $\sim 1.5$  до  $\sim 6$  (с учетом завышения от  $\sim 1.2$  до  $\sim 4.8$ ). Однако при дальнейшем возрастании альвеновской скорости до  $\sim 100$  км/с отношение температур сохраняется на этом уровне. При  $v_A \geq 100$  км/с мала статистика случаев наблюдения. Аппроксимация данных Рис. 3.27 дает следующую зависимость:  $\lg T_\alpha/T_p = (0.51 \pm 0.08) \lg v_A$  [км/с] -  $(0.31 \pm 0.05)$ .

Для изучения связи преимущественного ускорения  $\alpha$ -частиц с их преимущественным нагревом обратимся к Рис. 3.28, на котором представлена зависимость  $T_\alpha/T_p$  от  $v_\alpha - v_p$ , полученная по данным спутника *Прогноз 7* [23, 34, 249, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990; Yermolaev and Stupin, 1990]. При возрастании  $v_\alpha - v_p$  от  $\sim -60$  до  $\sim -10$  км/с отношение температур  $T_\alpha/T_p$  уменьшается от  $\sim 8$  до  $\sim 4$  (с учетом завышения от  $\sim 6.7$  до  $\sim 3.3$ ), далее отношение температур сохраняется вблизи 3.5 и при дальнейшем росте  $v_\alpha - v_p$  от  $\sim -10$  до  $\sim 70$  км/с возрастает до  $\sim 10$  (с учетом завышения до  $\sim 8.3$ ).

Полученные по данным космических экспериментов на спутниках *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977], *OGO 5*, *IMP 6-8* [178, Neugebauer and Feldman, 1979] и *Прогноз 7* (данные Рис. 3.28 с учетом завышения) зависимости отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  показаны на Рис. 3.29. Данные спутников *OGO 5* и *IMP 6-8* на этом рисунке были аппроксимированы выражениями  $T_\alpha/T_p = 0.019(v_\alpha - v_p)$  [км/с] + 4.3 (штриховая линия) и  $T_\alpha/T_p = (0.042 \pm 0.011)(v_\alpha - v_p)$  [км/с] +  $(4.5 \pm 0.4)$  (штрих-пунктирная линия). По данным спутника *Прогноз 1* (светлые кружки) не было выделено возрастание отношения температур  $T_\alpha/T_p$  при увеличении разности скоростей  $v_\alpha - v_p$ . Возможно, это связано со сравнительно небольшой статистикой случаев наблюдения при достаточно большом разбросе оцениваемых параметров. Такой разброс может быть вызван неодновременностью измерений энергетических спектров  $\alpha$ -частиц и протонов, которые измерялись последовательно в цикле продолжительностью около 44 минут [40, 86, Зерцалов и др., 1976; Bosqued et al., 1977]. Данные, полученные на спутнике *Прогноз 7*, свидетельствуют о прямой корреляции параметров  $T_\alpha/T_p$  и  $v_\alpha - v_p$  для диапазона значений  $v_\alpha - v_p$  от 0 до  $\sim 70$  км/с. Кроме того получены указания на возрастание  $T_\alpha/T_p$  при уменьшении  $v_\alpha - v_p$  в диапазоне  $v_\alpha - v_p \leq -10$  км/с, в то время как для других экспериментов данные в диапазоне значений  $v_\alpha - v_p < -20$  км/с отсутствуют. (Отметим, что в данных спутника *OGO 5* [178, Neugebauer and Feldman, 1979] имеется указание, что  $T_\alpha/T_p$  возрастает от  $\sim 3.9$  при  $v_\alpha - v_p \approx 0$  до  $\sim 4.4$  при  $v_\alpha - v_p \approx -20$  км/с). Поскольку наблюдений на спутнике *Прогноз 7* в диапазоне  $v_\alpha - v_p < -20$  км/с сравнительно немного ( $\sim 1300$  из  $\sim 10700$  измерений), то аппроксимация данных



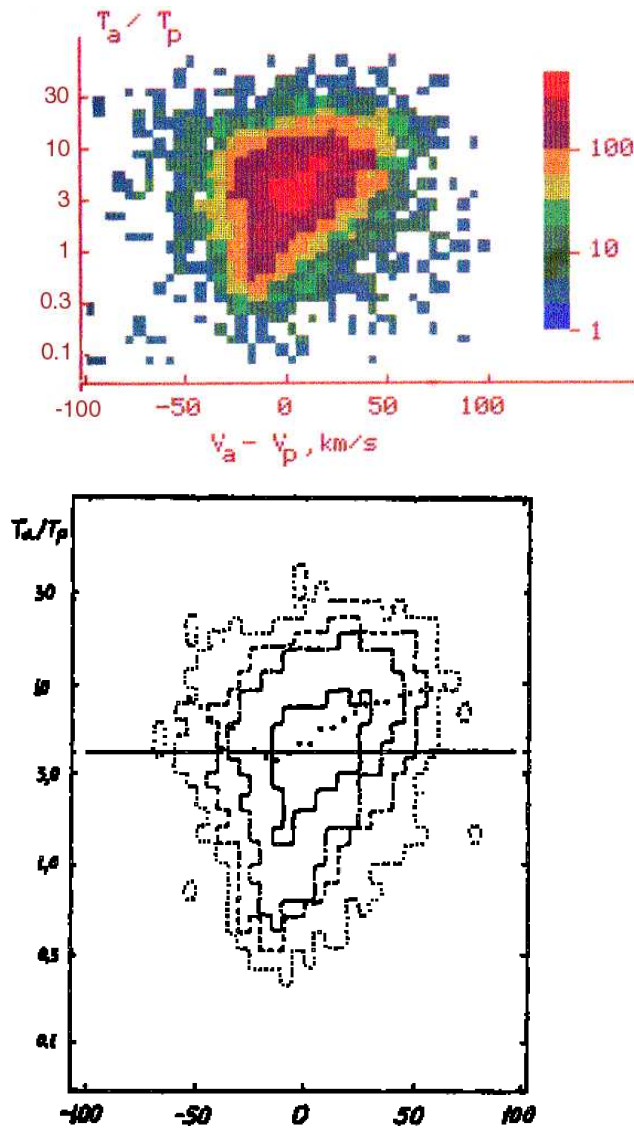


Рис. 3.28: Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от разности их переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990].

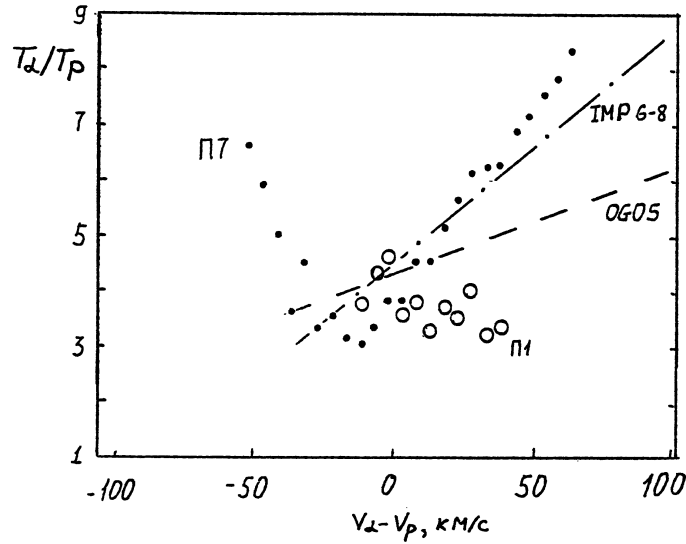


Рис. 3.29: Средняя зависимость отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от разности их переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$  по данным спутников *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977], OGO 5, *IMP 6-8* [178, Neugebauer and Feldman, 1979] и *Прогноз 7* [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990].

спутника *Прогноз 7* линейной функцией во всем диапазоне дает положительную корреляцию  $T_\alpha/T_p = 0.04(v_\alpha - v_p) \text{ км/с} + 4.2$ , и эта зависимость оказывается близкой к зависимостям, полученным на спутниках *IMP 6-8*. В целом по данным спутника *Прогноз 7* может быть сделан вывод, что отношение температур  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с модулем разности скоростей  $|v_\alpha - v_p|$   $\alpha$ -частиц и протонов солнечного ветра.

В теоретической работе [134, Hernandez and Marsch, 1985] были получены указания, что силы трения между двумя ионными распределениями, смещенными в пространстве скоростей относительно друг друга, стремятся нагреть обе составляющие таким образом, что отношение температур  $T_\alpha/T_p$  изменяется от величины  $\sim 1$  при малой разности скоростей до величины  $(m_p n_p)/(m_\alpha n_\alpha)$  при большой разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов. Так как этот эффект не зависит от знака разности скоростей, а только от ее величины, то представленные на Рис. 3.28 и 3.29 данные спутника *Прогноз 7* качественно согласуются с предсказаниями рассматриваемой гипотезы. Для количественного анализа результатов эксперимента с моделью на Рис. 3.30 представлены зависимости отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от относительной разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $X = (v_\alpha - v_p)/W_T = (v_\alpha - v_p)/(2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p))^{1/2}$  для трех различных интервалов относительного содержания  $\alpha$ -частиц: (1)  $n_\alpha/n_p < 2\%$  (темные кружки на Рис. 3.30), (2)

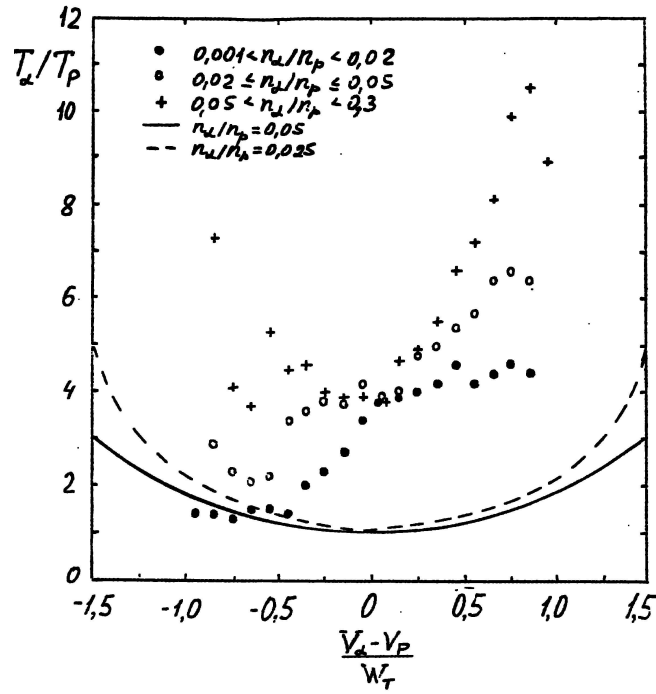


Рис. 3.30: Средняя зависимость отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от разности их переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$ , нормированной на среднюю тепловую скорость  $W_T = [2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$ , для различных интервалов относительного содержания  $\alpha$ -частиц по данным спутника *Прогноз 7* [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990]: темные кружки -  $n_\alpha/n_p < 2\%$ , светлые кружки -  $2\% \leq n_\alpha/n_p \leq 5\%$  и крестики -  $n_\alpha/n_p > 5\%$ . Модельные расчеты [134, Hernandez and Marsch, 1985] представлены сплошной линией для  $n_\alpha/n_p = 5\%$  и штриховой линией для  $n_\alpha/n_p = 2,5\%$ .

$2\% \leq n_\alpha/n_p \leq 5\%$  (светлые кружки) и (3)  $n_\alpha/n_p \geq 5\%$  (крестики), а также результаты модельных расчетов [134, Hernandez and Marsch, 1985] для  $n_\alpha/n_p = 5\%$  (сплошная линия) и  $n_\alpha/n_p = 2.5\%$  (штриховая линия). Для низкого содержания гелия в интервале  $X \leq -0.5$  отношение температур  $T_\alpha/T_p$  сохраняется постоянным  $\sim 1.5$ , в интервале  $-0.5 \leq X \leq 0.5$  растет до  $\sim 4.5$  и при  $X \geq 0.5$  сохраняется вблизи этой величины. Для среднего содержания гелия в интервале  $X$  от  $\sim -1.0$  до  $\sim -0.7$  отношение температур падает от  $\sim 3$  до  $\sim 2$ , в интервале  $X$  от  $\sim -0.7$  до  $\sim 0.8$  растет от  $\sim 2$  до  $\sim 6.5$ . Для высокого содержания гелия в интервале  $X$  от  $\sim -0.8$  до  $\sim 0$  отношение температур немонотонно уменьшается от  $\sim 7.0$  до  $\sim 4.0$ , а в диапазоне  $X$  от  $\sim 0$  до  $\sim 1.0$  возрастает от  $\sim 4.0$  до  $\sim 10$ . Таким образом зависимость отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от модуля относительной разности скоростей  $X$   $\alpha$ -частиц и протонов наблюдается лишь для течений с большим содержанием гелия ( $n_\alpha/n_p > 5\%$ ). Кроме того, для положительных величин  $X$  значения  $T_\alpha/T_p$  тем выше, чем выше содержание  $\alpha$ -частиц. Следовательно, детальный анализ данных спутника *Прогноз 7* качественно не противоречит гипотезе [134, Hernandez and Marsch, 1985], но указывает на заметно более сложный характер рассматриваемых зависимостей.

### 3.7 О роли столкновений в выравнивании скоростей и температур протонов и $\alpha$ -частиц

Одним из возможных механизмов выравнивания переносных скоростей и кинетических температур различных ионных компонент солнечного ветра являются кулоновские столкновения [174, Neugebauer, 1981]. По данным селективных измерений на спутнике *Прогноз 7* в работе [21, Ермолаев, 1986] были представлены предварительные оценки отношений времени расширения (распространения) течения к характерному времени обмена импульсом частиц при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  на границах интервала сильного возрастания разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношений времени расширения течения к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  на границах интервала сильного изменения отношения температур  $T_\alpha/T_p$ . Эти оценки показали, что средняя разность скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов составляет  $\sim 20$  км/с при  $\tau_e/\tau_s \sim 1.5 \cdot 10^{-2}$  и близка к нулю при  $\tau_e/\tau_s \sim 0.8$ , а отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов составляет  $\sim 4$  при  $\tau_e/\tau_c \sim 8 \cdot 10^{-2}$  и близко к 1 при  $\tau_e/\tau_c \sim 1.2$ .

С целью получения более подробных данных о зависимостях  $v_\alpha - v_p$  от  $\tau_e/\tau_s$  и  $T_\alpha/T_p$  от  $\tau_e/\tau_c$  были построены двумерные гистограммы для этих параметров, а также для  $(v_\alpha - v_p)/v_A$ , и определены средние значения разности скоростей и отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов в элементарных интервалах, соответственно, по  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  (см. Рис. 3.31, 3.33 и 3.35), при этом параметры  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  определялись по формулам (26-28), представленным в разделе 2.4.

В целом данные, представленные на Рис. 3.31 и 3.35, согласуются как с предварительными результатами [21, Ермолаев, 1986], так и с результатами других экспериментов (см. ниже).

Помимо систематического уменьшения средней величины  $v_\alpha - v_p$  при увеличении  $\tau_e/\tau_s$  на Рис. 3.31 обращают на себя внимание два факта: (1) в столкновительном солнечном ветре ( $\tau_e/\tau_s \geq 1$ )  $\alpha$ -частицы в среднем движутся медленнее, чем протоны, (2) с ростом отношения времен  $\tau_e/\tau_s$  уменьшается наблюдаемое отклонение (разброс) экспериментальных значений  $v_\alpha - v_p$  от средних значений независимо от знака этого отклонения (хотя случаев  $v_\alpha > v_p$  значительно больше, чем случаев  $v_\alpha < v_p$ ). Поведение величины  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  на Рис. 3.33 аналогично изменению  $v_\alpha - v_p$ , однако в отличие от  $v_\alpha - v_p$  разброс  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  приблизительно постоянен во всем диапазоне  $\tau_e/\tau_s$ .

Как видно из Рис. 3.32 и 3.34, в целом данные спутника *Прогноз 7* согласуются с результатами экспериментов на спутниках *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и предварительными результатами (светлые кружки на Рис. 3.32) *Прогноз 7* [21, Ермолаев, 1986]. Таким образом, селективные измерения  $\alpha$ -частиц и протонов на спутнике *Прогноз 7* подтверждают вывод о том, что кулоновские столкновения оказывают заметное влияние на уменьшение разности переносных скоростей различных ионных компонент солнечного ветра. Однако для объяснения того факта, что в столкновительном солнечном ветре  $\alpha$ -частицы в среднем движутся медленнее протонов, необходимо привлекать дополнительные физические механизмы.

На Рис. 3.36 показаны средние зависимости отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от отношения времени расширения течения к времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  для космических экспериментов на спутниках *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *IMP 6* [106, Feldman et al., 1974], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* (предварительные результаты [21, Ермолаев, 1986] показаны светлыми кружками, а окончательные результаты - темными). Результаты всех четырех экспериментов находятся в хорошем соответствии и указывают на важную роль кулоновских столкновений в выравнивании температур различных ионных компонент солнечного ветра.

Приведенные в настоящем разделе данные различных космических экспериментов не противоречат гипотезе о роли кулоновских столкновений в выравнивании скоростей и температур различных ионных составляющих солнечного ветра, но, строго говоря, они не могут рассматриваться как окончательное свидетельство в пользу гипотезы о решающей роли именно кулоновских столкновений. Дело в том, что в отношения времен  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  входит множитель  $n/v_p$ , который может рассматриваться как параметр, характеризующий "число столкновений" любой природы, и который изменяется в солнечном ветре более, чем на 2 порядка величины. Для установления природы столкновений необходимо исследовать зависимости разности скоростей и отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов от других

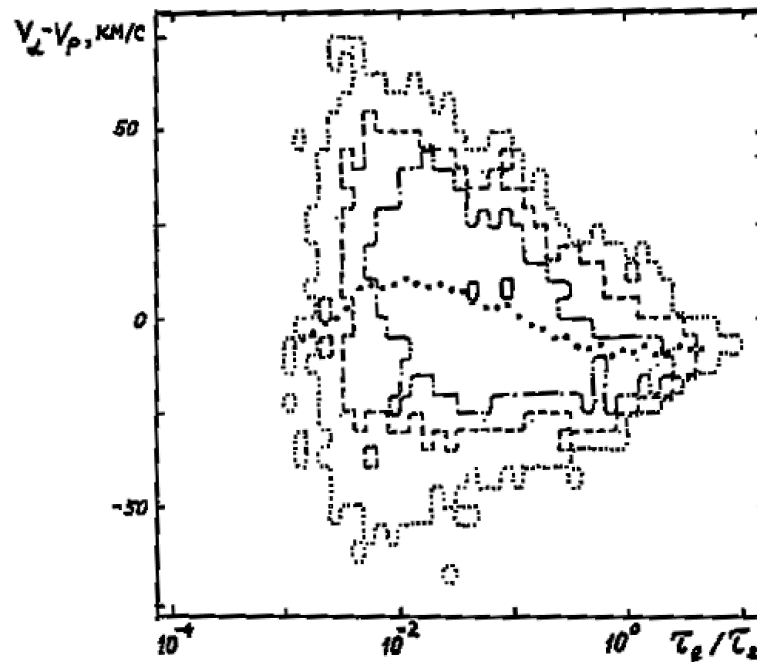
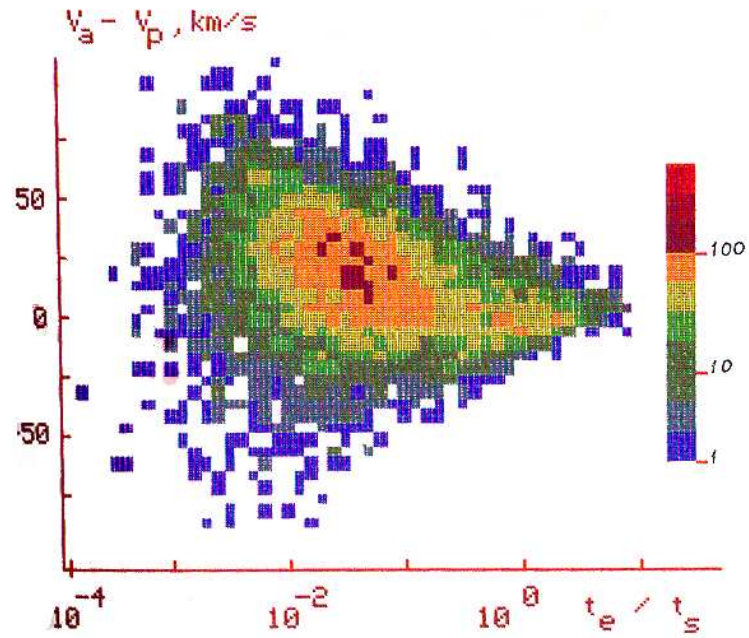


Рис. 3.31: Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра  $\tau_e$  к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_s$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990].

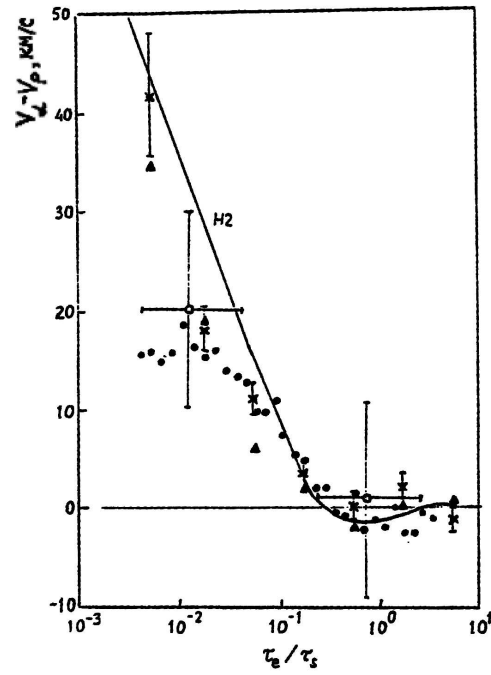


Рис. 3.32: Средняя зависимость разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e / \tau_s$  по данным спутников *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], и *Прогноз 7* (данные [21, Ермолаев, 1986] и Рис. 3.31).

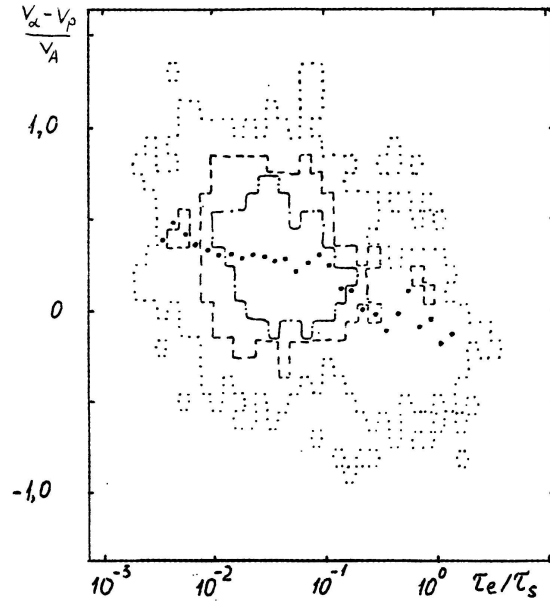


Рис. 3.33: Двумерная гистограмма зависимости отношения разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов к альвеновской скорости  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990].

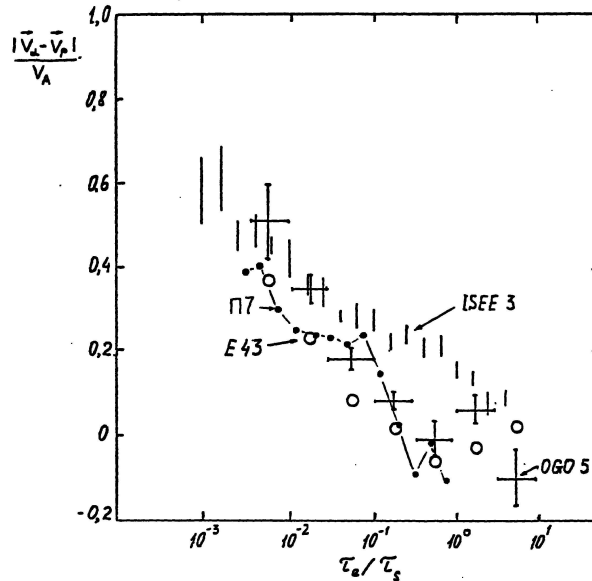


Рис. 3.34: Средняя зависимость отношения разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов к альвеновской скорости  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутников *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990].



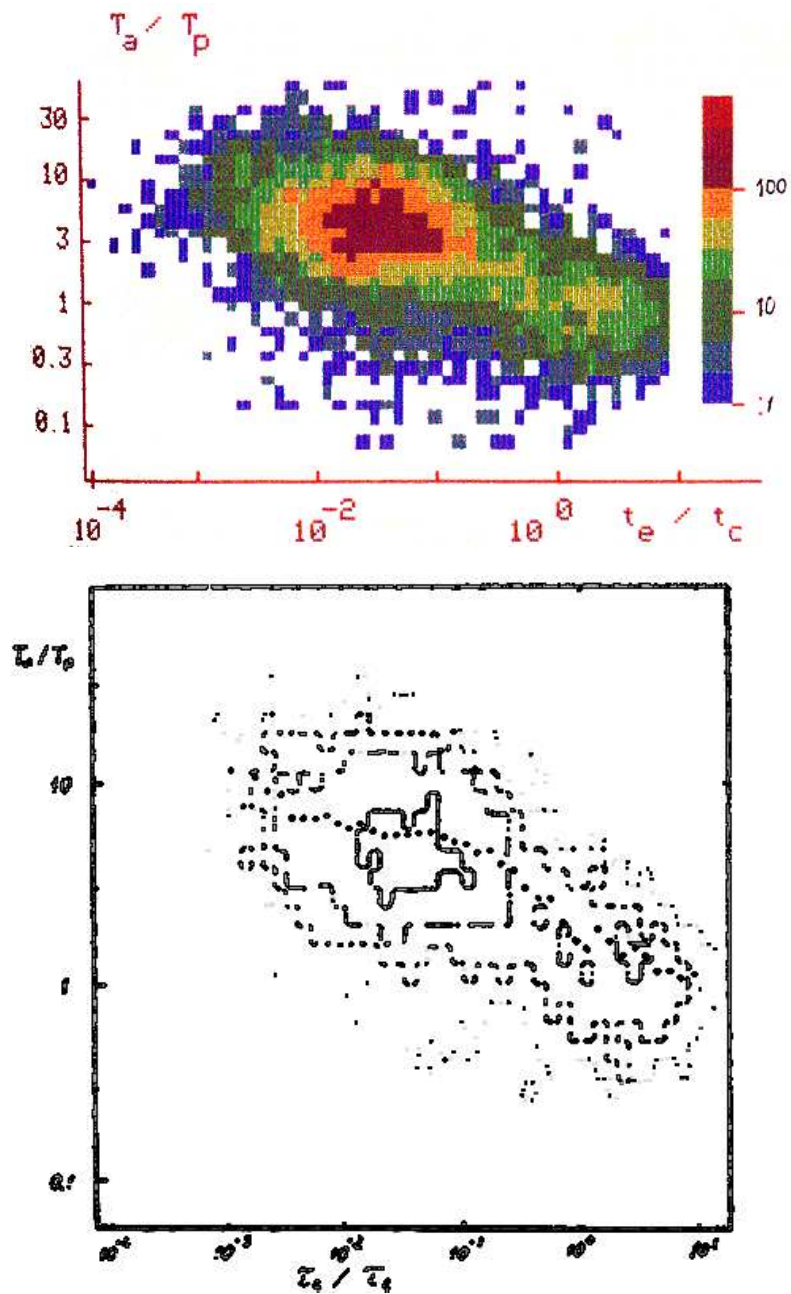


Рис. 3.35: Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990].

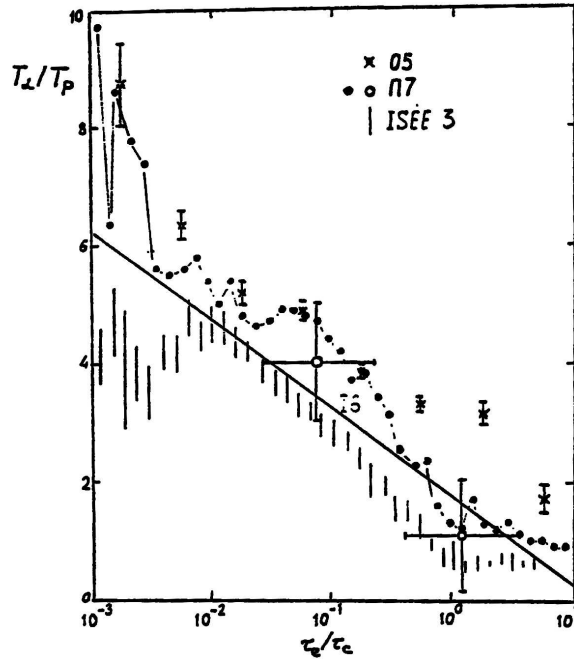


Рис. 3.36: Средняя зависимость отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  по данным спутников *IMP 6 OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* (данные [21, Ермолаев, 1986] и Рис. 3.35).

мало изменяющихся параметров на фоне сильно изменяющейся величины  $n/v_p$  (см. формулы 2.24-2.26).

Такая попытка была сделана по данным космического аппарата *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985], когда изучалась зависимость  $T_\alpha/T_p$  от  $T_{ef} = (m_\alpha T_\alpha + m_p T_p)/(m_\alpha + m_p)$  для данных, отселектированных по интервалам величины  $n/v_p$ . Для всех интервалов  $n/v_p$  величина  $T_\alpha/T_p$  возрастает с ростом  $T_{ef}$ , качественно согласуясь с приведенным выше определением  $T_{ef}$ . Однако не было обнаружено никаких различий для кривых зависимости  $T_\alpha/T_p$  от  $T_{ef}$  в разных интервалах величины  $n/v_p$ , т.е. зависимости от параметра  $n/v_p$ .

По данным спутника *Прогноз 7* этот вопрос был проанализирован достаточно подробно [25, Ермолаев, 1994], и результаты показаны на Рис. 3.37, 3.38 и 3.39, которые представляют собой двумерные зависимости от  $n/v_p$  и от одной из трех температур: а) числа измерений, б) отношения температур  $T_\alpha/T_p$  и в) отношения времен  $\tau_e/\tau_c$ . Рисунки различаются тем, что по оси абсцисс в логарифмической шкале отложены  $T_{ef}^{3/2}$ ,  $T_\alpha^{3/2}$  и  $T_p^{3/2}$ , соответственно. Рис. 3.37б показывает результаты аналогичные полученным на космическом аппарате *ISEE 3*:  $T_\alpha/T_p$  возрастает с ростом  $T_{ef}$  в разных интервалах величины  $n/v_p$ , при этом заметной зависимости  $T_\alpha/T_p$  от величины  $n/v_p$  не наблюдается. Кроме того, можно отметить, что это справедливо как для столкновительной, так и бесстолкновительной плазмы (см. Рис. 3.37в). Аналогичный результат получен и на Рис. 3.38. По-видимому, это связано с тем, что согласно определению  $T_{ef}$  составляет от  $0.8T_\alpha$  до  $1.0T_\alpha$ , поэтому Рис. 3.37 в основном отражает поведение

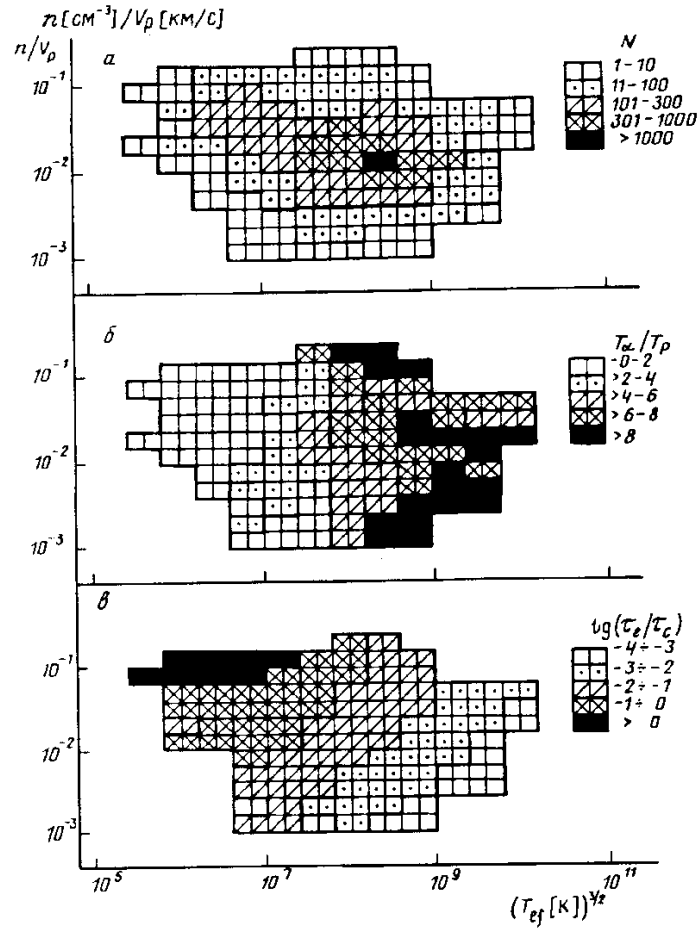


Рис. 3.37: Двумерные зависимости а) числа измерений  $N$ , б) отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  и в) отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  от параметров  $n/v_p$  и  $T_{ef}$  по данным спутника *Прогноз 7* [25, Ермолаев, 1994].

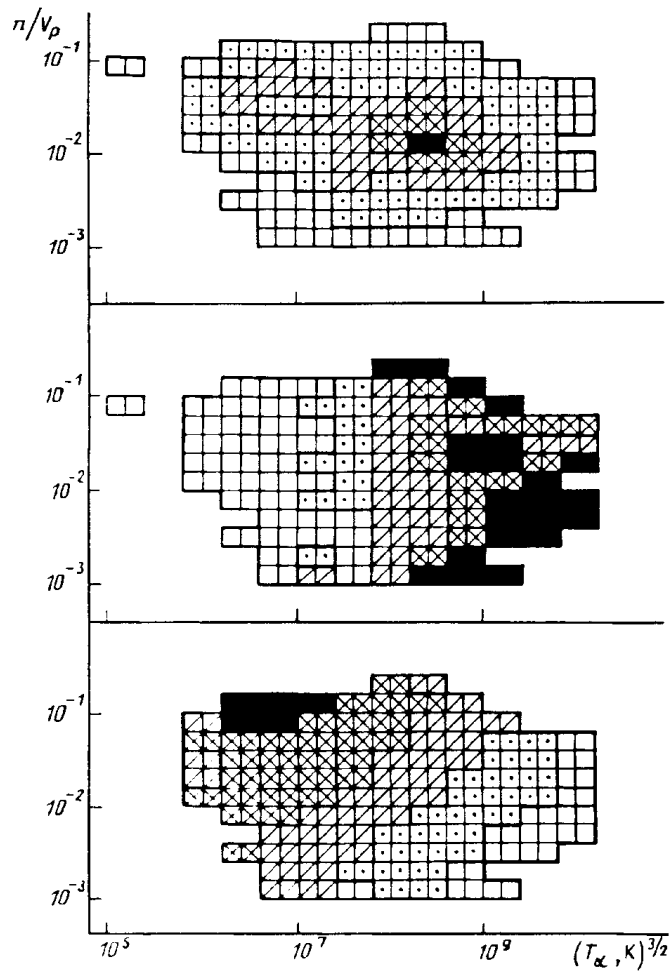


Рис. 3.38: То же, что на Рис. 3.37, но для температуры  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha$ .

параметров при изменении  $T_\alpha$ .

Рис. 3.39 кардинальным образом отличается от Рис. 3.37 и 3.38: отношение температур  $T_\alpha/T_p$  в целом уменьшается с ростом  $T_p$  (без заметной зависимости от величины  $n/v_p$ ) и только в небольшом интервале столкновительной плазмы ( $(T_p[K])^{3/2} < 10^7$  и  $n[\text{см}^{-3}]/v_p[\text{км/с}] \sim 0.1$ ) оно мало, при этом вследствие невысокой статистики можно лишь с известной долей осторожности утверждать, что в столкновительной плазме отношение температур  $T_\alpha/T_p$  падает с ростом  $n/v_p$ . В бесстолкновительной плазме изменение  $T_\alpha/T_p$  при изменении  $T_\alpha$  (так же как и  $T_{ef}$ ) и  $T_p$  согласуется с определением: величина  $T_\alpha/T_p$  пропорциональна  $T_\alpha$  и обратно пропорциональна  $T_p$  и не зависит от  $n/v_p$ . Таким образом, анализ, выполненный по данным космического аппарата *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] или представленный выше, не дает дополнительных аргументов в пользу гипотезы о ведущей роли именно кулоновских столкновений в выравнивании температур ионных компонент в солнечном ветре.

Анализ данных спутника *Прогноз 7* о зависимости  $v_\alpha - v_p$  и  $T_\alpha/T_p$  соответственно от  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  (см. Рис. 3.32 и 3.36) позволяет предположить, что в среднем скорости и температуры компонент выравниваются на таких расстояниях, где отношения времен  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  достигают значения около 1 для

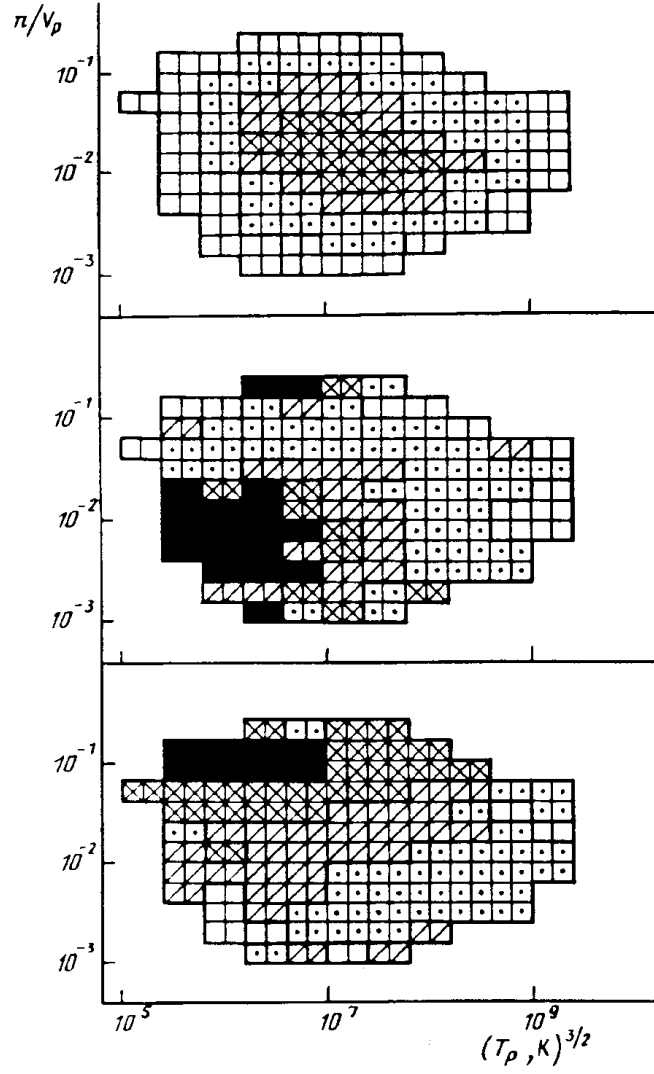


Рис. 3.39: То же, что на Рис. 3.37, но для температуры протонов  $T_p$ .

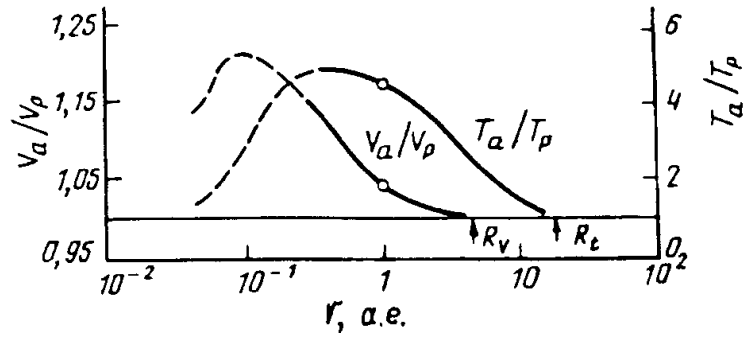


Рис. 3.40: Средние зависимости отношений скоростей  $v_\alpha/v_p$  и температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от гелиоцентрического расстояния [249, 244, Yermolaev and Supin, 1990; Yermolaev, 1992].

средних значений параметров солнечного ветра. Сделав ряд предположений об изменении гидродинамических параметров солнечного ветра при изменении гелиоцентрического расстояния, получим оценки, что скорости  $\alpha$ -частиц и протонов в среднем выравниваются на расстоянии  $\sim 7$  а.е., а их температуры – на  $\sim 20$  а.е. [249, 244, Yermolaev and Stupin, 1990; Yermolaev, 1992]. На Рис. 3.40 схематически показана динамика скорости и температуры  $\alpha$ -частиц относительно протонов при изменении гелиоцентрического расстояния. Для расстояния менее 0.3 а.е. (штрихованные участки кривых) прямые измерения в настоящее время отсутствуют. Данные об измерении параметров гелия на больших расстояниях (например, такие измерения проводились на космических аппаратах *Voyager 2* и *Pioneer 10, 11*) пока еще не опубликованы. В работе [161, Liu et al., 1995] приводятся измерения на КА *Ulysses*, согласно которым на гелиоцентрических расстояниях от 1 до 5 а.е. отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  изменяется сравнительно мало. Это означает, что либо отношение времен  $\tau_e/\tau_c$  изменяется с расстоянием несколько медленнее, чем предполагалось в модели [249, 244, Yermolaev and Stupin, 1990; Yermolaev, 1992], либо механизмы преимущественного нагрева  $\alpha$ -частиц действуют на гелиоцентрических расстояниях более 1 а.е. и компенсируют влияние столкновений на уменьшение отношения температур.

### 3.8 Выводы

Описанные в настоящей главе результаты статистического анализа гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра, полученные с помощью энерго- и энерго-масс-спектрометров плазмы на спутниках *Прогноз 7*, *8* и *Прогноз-10-Интеркосмос*, позволяют сделать следующие важные выводы.

(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) При изменении скорости солнечного ветра гидродинамические параметры протонов и  $\alpha$ -частиц изменяются следующим образом:

- температура протонов  $T_p$  возрастает с изменением скорости солнечного ветра  $v_p$  в среднем по степенному закону с показателем  $2.28 \pm 0.18$ ,

- концентрация ионов  $n$  уменьшается с изменением скорости солнечного ветра  $v_p$  в среднем по степенному закону с показателем  $-1.4 \pm 0.5$  для всего интервала изменения скорости, при этом для интервала  $v_p = 270-500$  км/с показатель составляет  $-2.0 \pm 0.3$  (это соответствует сохранению величины потока импульса  $nv_p^2$  при изменении скорости  $v_p$ ), а для интервала  $v_p = 550-700$  км/с показатель составляет  $-0.8 \pm 1.0$  (при этом с увеличением скорости возрастает величина потока импульса),

- за счет более слабой зависимости концентрации ионов  $n$  от скорости

солнечного ветра  $v_p$  в области высоких скоростей ( $v_p \geq 550$  км/с) температура протонов  $T_p$  и величина потока импульса  $nv_p^2$  одновременно возрастают с увеличением скорости в таких течениях,

- относительная концентрация  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  в среднем возрастает от  $\sim 1\%$  до  $\sim 6\%$  при увеличении скорости солнечного ветра  $v_p$  от  $\sim 300$  до  $\sim 550$  км/с, а при дальнейшем увеличении скорости наблюдается тенденция к уменьшению  $n_\alpha/n_p$ ,

- разность переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  в среднем возрастает от  $\sim -5$  км/с до  $\sim +15$  км/с при увеличении скорости солнечного ветра от  $\sim 300$  до  $\sim 530$  км/с, а при дальнейшем увеличении скорости величина  $v_\alpha - v_p$  имеет тенденцию к уменьшению,

- отношение кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  в среднем возрастает от  $\sim 1.5$  до  $\sim 4.5$  при увеличении скорости солнечного ветра от 300 до 400 км/с и при дальнейшем увеличении скорости почти не изменяется, при этом наилучшая аппроксимация достигается при  $\lg T_\alpha/T_p = (0.64 \pm 0.15) \lg v_p [\text{км/с}] - (1.95 \pm 0.12)$ .

(3) 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  $\sim 10 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , тем самым не подтверждается предположение [121, Geiss, 1970] о важной роли основного, протонного, потока солнечного ветра на вытягивание малых ионных составляющих в межпланетное пространство.

(4) Отношение скоростей  $v_\alpha/v_p$  и температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов уменьшаются с увеличением температур протонов  $T_p$  солнечного ветра, соответственно, от  $1.007 \pm 0.054$  до величины  $0.998 \pm 0.076$  и от  $5.0 \pm 3.9$  до  $2.7 \pm 1.8$  при  $T_p \geq 3 \cdot 10^5 \text{ К}$ , относительная концентрация  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  в среднем также уменьшается с возрастанием температуры протонов солнечного ветра.

(5) Разность скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношение температур  $T_\alpha/T_p$  в среднем возрастают, соответственно, от  $\sim -5$  км/с 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:  $v_\alpha - v_p [\text{км/с}] = (0.26 \pm 0.13) v_A [\text{км/с}] - (9.5 \pm 1.1)$  и  $\lg T_\alpha/T_p = (0.51 \pm 0.08) \lg v_A [\text{км/с}] - (0.31 \pm 0.05)$ . 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  $\sim 5$ .

(6) Отношение температур  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с модулем разности скоростей  $v_\alpha - v_p$   $\alpha$ -частиц и протонов.

(7) Разность скоростей  $v_\alpha - v_p$ , отношение разности скоростей и альвеновской скорости  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  и отношение температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов уменьшаются при возрастании эффективности столкновений в солнечном ветре. Однако не удалось получить свидетельств в подтверждение, что именно кулоновские столкновения приводят к выравниванию температур различных ионных компонент.

(8) Период наблюдений на спутнике *Прогноз 7* пришелся на фазу роста

в цикле солнечной активности и характеризуется необычным повышением концентрации ионов в высокоскоростных ( $v_p \geq 550$  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 [101, 13, 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.

(9) 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 от  $\sim -1$  до  $\sim +1$ , для  $0.02 \leq n_\alpha/n_p \leq 0.05$   $T_\alpha/T_p$  возрастает от  $\sim 2$  до  $\sim 6.5$  при увеличении 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 от  $\sim -1.0$  до  $\sim 0$  и возрастает от  $\sim 4$  до  $\sim 10$  при увеличении от  $\sim 0$  до  $\sim 1.0$ . Полученные результаты не вполне согласуются с предсказаниями модели [134, Hernandez and Marsch, 1985] и имеют более сложный характер.

(10) Совокупность экспериментальных данных позволяет предложить следующий сценарий возникновения отклонения от термодинамического равновесия различных ионных компонент солнечного ветра. На гелиоцентрических расстояниях  $10-25 R_0$ , где по результатам радиопросвечивания наблюдается сильная неоднородность параметров плазмы [61, Яковлев и др., 1987], происходит перемешивание разноскоростных течений плазмы с различным относительным содержанием малых ионных составляющих, в результате образуются течения с неравновесными переносными скоростями [101, 13, 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 наблюдается 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* [165, 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.



## Глава 4

# Крупномасштабная структура солнечного ветра

Приведенный выше экспериментальный материал демонстрирует большое разнообразие условий в солнечном ветре, где большинство параметров на орбите Земли варьирует в очень широких пределах. Однако в этой главе мы покажем, что соотношения между параметрами подчиняются определенным закономерностям, связанным как с динамическими процессами в межпланетной среде, так и со структурами и процессами в солнечной короне.

### 4.1 Постановка задачи и описание методики

При достаточно углубленной интерпретации результатов измерений на КА необходимо предварительно выявить характерные структуры и провести классификацию типов течений солнечного ветра, так как физические процессы могут существенно отличаться в течениях солнечного ветра, имеющих различное происхождение. Ранее в разделе 1.3.3. были описаны результаты феноменологического подхода к изучению крупномасштабной структуры солнечного ветра. Здесь мы определяем состояние (типы) течений солнечного ветра на основе модельных представлений о процессах формирования и динамики солнечного ветра.

В первых гидродинамических моделях формирования солнечного ветра [199, 133, 144, Parker, 1961; Hartle and Sturrock, 1968; Hundhausen, 1972] исследовалось ускорение корональной плазмы за счет высокой температуры короны и были получены значения гидродинамических параметров солнечного ветра на орбите Земли как функции температуры солнечной короны. Однако предсказанные параметры в большинстве случаев отличаются от результатов наблюдений: во-первых, измеряемые параметры варьируют сильнее, чем это могло бы следовать из вариаций температуры солнечной короны, и, во-вторых, скорость и температура солнечного ветра оказываются в среднем выше, а концентрация ниже, чем предсказывалось в моделях. Для предсказания обычно

наблюдаемых параметров солнечного ветра в простую гидродинамическую модель необходимо вводить дополнительные источники энергии, физическая природа которых была предметом исследования во многих работах (см. Введение и обзоры [140, 46, 14, 57, Hollweg, 1978; Коваленко, 1983; Веселовский, 1984; Усманов, 1999]).

В ряде работ (см. например [159, Leer and Holzer, 1980]) было показано, что независимо от природы источника энергии его наличие оказывает сильное влияние на гидродинамические параметры солнечного ветра, причем важную роль играет его положение относительно критической высоты, где скорость плазмы достигает скорости звука: если источник энергии расположен ниже критической высоты, то в поток увлекается большое число частиц плазмы и образуется плотное и медленное течение солнечного ветра; если источник энергии расположен выше критической высоты, то дополнительная энергия расходуется на увеличение скорости частиц плазмы и образуется менее плотное и более быстрое течение солнечного ветра. Так как тепловая энергия ионов солнечного ветра приблизительно на 2 порядка меньше их кинетической энергии, затратами энергии на нагрев плазмы можно в первом приближении пренебречь. Таким образом, в зависимости от величины и расположения источника дополнительной энергии течения солнечного ветра должны характеризоваться прежде всего соотношением между скоростью и концентрацией солнечного ветра.

Полученные с помощью КА данные о параметрах солнечного ветра чаще всего представляются в виде функции времени или скорости солнечного ветра. Такое представление данных позволило выявить существование двух типов (низко- и высокоскоростных) течений солнечного ветра, в которых характер поведения ряда параметров различен. Этот факт был интерпретирован как указание на то, что медленные и быстрые течения берут свое начало в областях с закрытыми и открытыми корональными магнитными полями, соответственно, [154, 182, 184, 217, 85, 109, 127, 58, Krieger et al., 1973; Neupert and Pizzo, 1974; Nolte et al., 1976; Sheeley et al., 1976; Borrini et al., 1981; Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981; Чашей, 1988]. Однако оба типа течения могут иметь скорости в диапазоне 400 - 500 км/с, и различать их только по величине скорости невозможно. Кроме того, некоторые высокоскоростные течения солнечного ветра могут быть связаны не только с корональными дырами, но и с нестационарными процессами в солнечной короне и межпланетной среде.

Значительно реже исследовались зависимости параметров солнечного ветра от его концентрации, при этом результаты экспериментов на различных КА не позволили сделать однозначных выводов о виде этих зависимостей. Например, по результатам измерений на спутнике *Explorer-34* было обнаружено слабое уменьшение относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  при увеличении концентрации [190, Ogilvie and Wilkerson, 1969]. Однако по данным спутника *Heos 1* никакой зависимости  $n_\alpha/n_p$  от  $n$  обнаружено не было [114, Formizano et al., 1970]. В то же время по данным спутника *Прогноз 7*

в низко- и среднескоростном ( $v_p < 450$  км/с) солнечном ветре (т.е. при дополнительной селекции данных по скорости СВ) было обнаружено уменьшение содержания гелия, кислорода, кремния и железа относительно водорода при возрастании концентрации (см. главу 5 и [259, 28, Застенкер и др., 1989; Ермолаев и Застенкер, 1990]). Как показывает Рис. 3.20, данные космических экспериментов *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34*, *43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* в области небольших потоков  $(1 - 3) \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> демонстрируют разные зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$ . Неоднозначные результаты измерений могут объясняться многопараметрическим характером связи гидродинамических параметров ионных составляющих солнечного ветра и, в частности, различным характером зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц от концентрации в различных типах течений солнечного ветра [29, Ермолаев и Ступин, 1990].

Эта неоднозначность может быть устранена, если исследовать зависимость параметров солнечного ветра одновременно от двух характеристик течений: концентрации и скорости, которые, согласно описанной выше модели [159, Leer and Holzer, 1980], указывают на условия в области формирования изучаемого течения, и затем построить по этим двум параметрам новую классификацию типов течений солнечного ветра и связать типы течений со структурой солнечной короны. Можно полагать, что отселектированные в соответствии с этой классификацией (т.е. по величине концентрации и скорости) события будут иметь более четко выраженные зависимости от гидродинамических параметров солнечного ветра, так как они будут иметь одинаковое происхождение. Такой подход позволит более надежно исследовать как процессы формирования течений солнечного ветра, так и их динамику в межпланетном пространстве. Ниже мы покажем, что для классификации типов течений солнечного ветра оказываются полезными еще 2 параметра солнечного ветра: содержание гелия относительно водорода  $n_\alpha/n_p$  и отношение теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ . Как уже отмечалось, химический состав течения солнечного ветра однозначно связан с условиями в области формирования данного течения в солнечной короне, а параметр  $\beta$  характеризует процесс выхода объема плазмы из короны и его динамики в межпланетном пространстве.

Хотя предложенный подход к изучению солнечного ветра и солнечной короны, по нашему мнению, имеет в определенной степени универсальный характер, справедливость такого подхода проверяется по данным, полученным на спутнике *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. В настоящей главе статистическими методами исследуются двумерные зависимости от скорости  $v_p$  и концентрации  $n$  (т.е. распределения на плоскости  $n - v_p$ ) модуля магнитного поля  $B$ , температуры протонов  $T_p$ , отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  и относительного содержания гелия  $n_\alpha/n_p$ , т.е. тех параметров, которые отражают происхождение наблюдаемых течений.

По величине и характеру изменения этих параметров на плоскости  $n - v_p$  предлагается классификация типов течений солнечного ветра и делается предположение о связи этих типов течений со структурой солнечной короны. С учетом этой классификации изучается также распределение на плоскости  $n - v_p$  разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения кинетических температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$  - частиц и протонов, которые в основном отражают динамику течений солнечного ветра в межпланетном пространстве.

## 4.2 Идентификация разных типов течений солнечного ветра

### 4.2.1 Двумерные зависимости параметров от скорости и концентрации

На рисунках 4.1 - 4.7 тонкими линиями показаны линии постоянного уровня, разделяющие области с различным количеством отдельных измерений в элементарной ячейке размером  $n^{i+1}/n^i=1.25$  и  $\Delta v_p=10$  км/с:  $>3$ ,  $>20$  и  $>65$ . Для повышения статистики (это особенно важно для параметров с невысокой точностью определения) средние значения этих параметров определялись в более крупных ячейках:  $n^{i+1}/n^i=1.56$  (т.е. пять интервалов на порядок) и  $\Delta v_p=25$  км/с. По полученным в этих ячейках средним значениям параметров проводились путем линейной интерполяции жирные кривые, представляющие собой линии постоянного уровня соответствующего параметра.

Начнем анализ полученных данных с распределения модуля магнитного поля  $B$ , показанного на Рис. 4.1 линиями  $B = 5, 7, 10$  и  $13$  нТ. В целом  $B$  возрастает как при увеличении скорости ветра, так и при увеличении концентрации. Однако по характеру изменений  $B$  плоскость  $\lg n - v_p$  может быть разбита на три области. В области  $v_p > 430$  км/с зависимость  $B$  от  $n$  монотонная и  $B$  возрастает от  $\sim 4$  до  $\sim 15$  нТ с ростом  $n$  от  $\sim 2$  до  $\sim 30$  см $^{-3}$ . В области  $v_p < 430$  км/с зависимость  $B$  от  $n$  носит немонотонный характер и можно выделить два района: при увеличении  $n$  до линии, соединяющей значения  $(n=40$  см $^{-3}$ ,  $v_p=320$  км/с) и  $(n=10$  см $^{-3}$ ,  $v_p=430$  км/с),  $B$  возрастает от  $\sim 5$  до  $\sim 10$  нТ, а выше этой линии убывает до  $\sim 6$  нТ.

Распределение температуры протонов показано на Рис. 4.2 линиями постоянного уровня  $T_p = 3, 6, 9, 12$  и  $18 \cdot 10^4$  К. В целом температура солнечного ветра увеличивается с ростом скорости, при этом зависимость от плотности выражена довольно слабо: небольшое уменьшение температуры наблюдается в области  $v_p=350 - 420$  км/с и  $n \geq 25$  см $^{-3}$  и увеличение температуры - в области  $v_p \geq 500$  км/с и  $n \geq 5$  см $^{-3}$ .

Отмеченные на Рис. 4.1 и 4.2 особенности наиболее наглядно проявляются на распределении отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ , которое представлено на Рис. 4.3 линиями  $\beta=0.5$  и  $1.0$ . В низкоскоростном ( $v_p <$

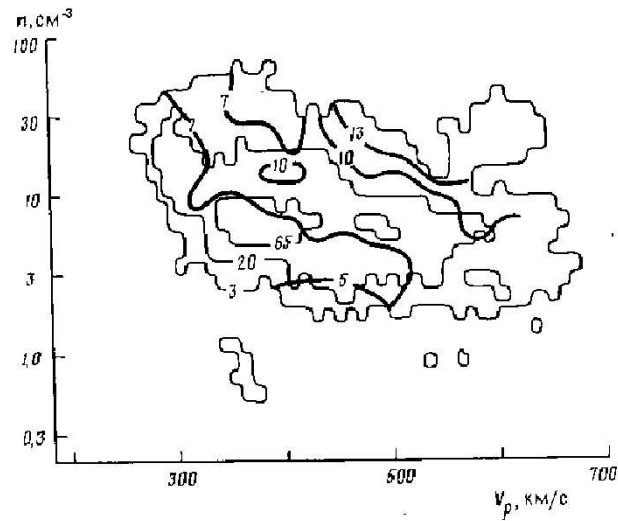


Рис. 4.1: Распределения на плоскости  $n-v_p$  (концентрация - скорость) величины магнитного поля солнечного ветра  $B$  (нТ) (жирная линия) и числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

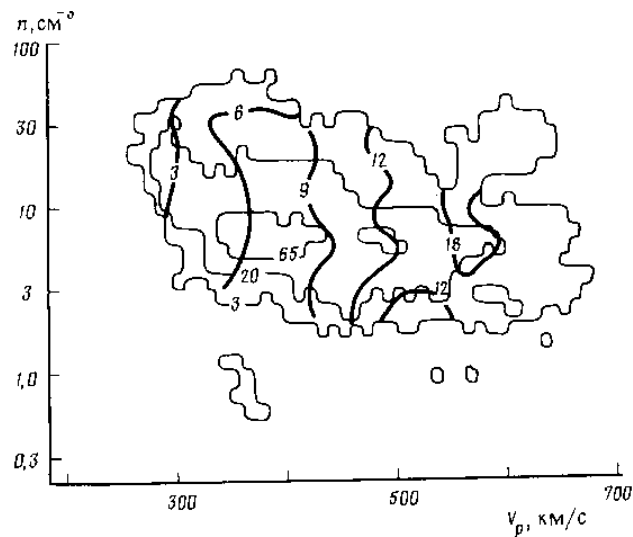


Рис. 4.2: Распределения на плоскости  $n-v_p$  (концентрация - скорость) температуры протонов солнечного ветра  $T_p(10^4\text{K})$  (жирная линия) и числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

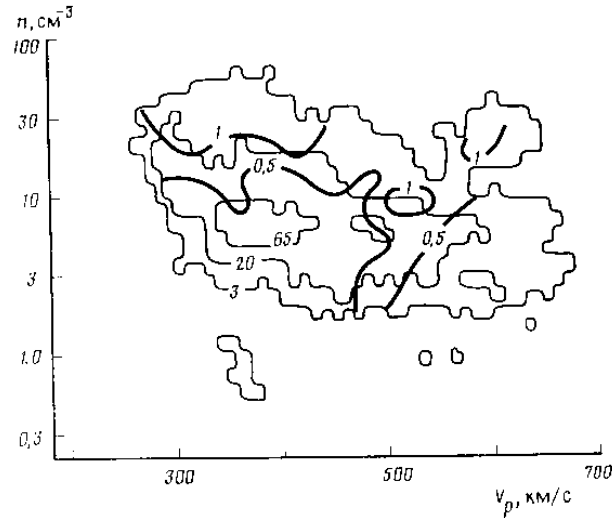


Рис. 4.3: Распределения на плоскости  $n - v_p$  (концентрация - скорость) отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  (жирная линия) и числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

450 км/с) солнечном ветре отсутствует зависимость  $\beta$  от скорости, при этом величина  $\beta$  возрастает от  $\sim 0,3$  до  $\sim 2$  при увеличении концентрации от  $\sim 2$  до  $\sim 50$  см $^{-3}$ ; в высокоскоростном ( $v_p > 500$  км/с) - в полосе шириной  $\sim 100$  км/с и с осевой линией, проходящей через точки с координатами ( $n = 3$  см $^{-3}$ ,  $v_p = 500$  км/с) и ( $n = 30$  см $^{-3}$ ,  $v_p = 620$  км/с), наблюдается немонотонный вдоль полосы максимум  $\beta$  от  $\sim 0.7$  до  $\sim 1.2$ . За пределами этой полосы наблюдается достаточно однородное распределение  $\beta$ , при этом величина  $\beta$  слабо возрастает от величины  $\sim 0.3$  до  $\sim 0.6$  при увеличении концентрации от  $\sim 2$  до  $\sim 50$  см $^{-3}$  и уменьшении скорости от 620 до 450 км/с.

На Рис. 4.4 показано распределение относительного содержания  $\alpha$ -частиц линиями  $n_\alpha/n_p = 1, 3, 5$  и 7% (жирные линии). На рисунке приводятся также линии постоянной величины потока (штрих-пунктирные):  $nv_p/(10^8$  см $^{-2}$  · с $^{-1}$ ) = 1, 3 и 10. Прежде всего необходимо отметить наличие трех различных областей, указанных на рисунке римскими цифрами I - III: в областях I и III относительное содержание  $\alpha$ -частиц уменьшается при увеличении концентрации, а в области II оно возрастает. Существуют две особенности областей в зависимости от скорости: (1) область I занимает диапазон скоростей  $v_p = 270 - 450$  км/с, область II - диапазон  $v_p = 350 - 500$  км/с и область III - диапазон  $v_p = 450 - 650$  км/с; (2) в среднем при увеличении скорости в области I величина относительного содержания гелия растет от  $\sim 1$  до  $\sim 6\%$ , в области II сохраняется на уровне 5-6%, а в области III уменьшается от  $\sim 5$  до  $\sim 3\%$ .

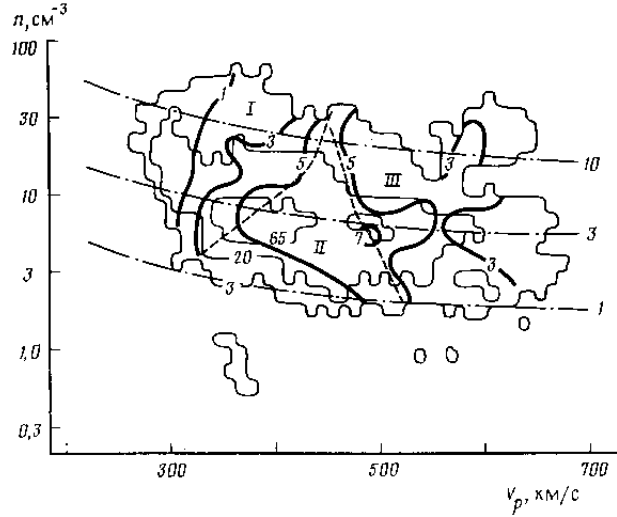


Рис. 4.4: Распределения на плоскости  $n - v_p$  (концентрация - скорость) относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  (жирная линия), числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) и величины потока  $nv_p$  ( $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) (линия штрих-пунктирная) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. Области I, II и III описаны в тексте.

При изменении величины потока солнечного ветра изменяется относительный вклад каждой из трех областей на плоскости  $\lg n - v_p$  при определении средних величин (см. Рис. 4.4): в диапазоне значений  $nv_p/(10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) = 1 - 3$  основной вклад принадлежит области II, а в диапазоне  $nv_p/(10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}) = 3 - 20$  - области I. Поэтому средняя величина  $n_\alpha/n_p$  изменяется при изменении величины потока аналогично ее изменению при изменении концентрации в этих областях; относительное содержание  $\alpha$ - частиц возрастает при увеличении потока  $nv_p/(10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1})$  от  $\sim 1$  до  $\sim 3$  и уменьшается при увеличении потока  $nv_p/(10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1})$  от  $\sim 3$  до  $\sim 20$ . Таким образом, данные Рис. 4.4 согласуются с выводом, сделанным нами ранее в разделе 3.4. (см. также [29, Ермолаев и Ступин, 1990]), что одномерная зависимость средней величины относительного содержания  $\alpha$ -частиц от скорости  $v_p$  и концентрации  $n$  (следовательно, и от потока  $nv_p$ ) солнечного ветра не является монотонной функцией, и величина  $n_\alpha/n_p$  имеет максимум в диапазоне  $v_p = 400 - 500 \text{ км/с}$  и  $n = 4 - 7 \text{ см}^{-3}$  (а также  $nv_p \approx 2.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ).

Распределение разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов показано на Рис. 4.5 линиями  $v_\alpha - v_p = -10, 0, +10$  и  $+20 \text{ км/с}$ . Отрицательные значения разности скоростей наблюдаются в области низкоскоростного солнечного ветра ( $v_p \leq 330 \text{ км/с}$ ), а также в наиболее плотных течениях при других значениях скорости ( $v_p \geq 350 \text{ км/с}$ ), при этом наблюдается локальный минимум разности скоростей в полосе максимума  $\beta$  (см. Рис. 4.3). Максимум величины разности скоростей  $\sim 30 \text{ км/с}$  наблюдается в среднескоростном ( $v_p = 400 - 500 \text{ км/с}$ ) и разреженном

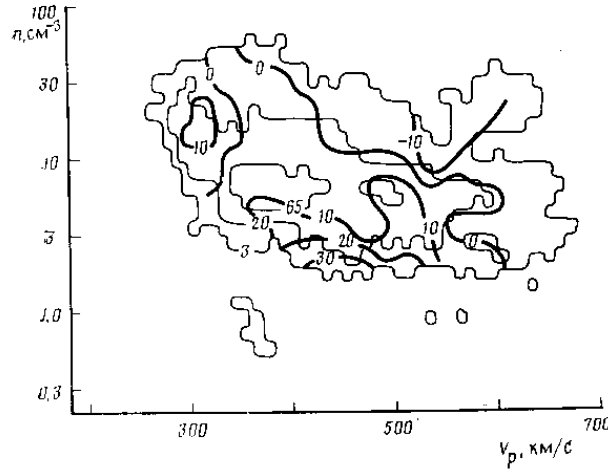


Рис. 4.5: Распределения на плоскости  $n - v_p$  (концентрация - скорость) разности скоростей  $\alpha$  частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  (жирная линия) и числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

( $n \leq 3 \text{ см}^{-3}$ ) солнечном ветре. В широком диапазоне скоростей  $v_p = 350 - 650 \text{ км/с}$  разность скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов уменьшается при увеличении концентрации солнечного ветра.

Распределение отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов показано линиями  $T_\alpha/T_p = 2, 4$  и  $6$  на Рис. 4.6. Общий характер распределения величины  $T_\alpha/T_p$  близок к распределению разности скоростей  $v_\alpha - v_p$ : значения  $T_\alpha/T_p < 4$  лежат в основном в низкоскоростном солнечном ветре ( $v_p \leq 330 \text{ км/с}$ ), а также в наиболее плотных течениях при других значениях скорости ( $v_p \geq 330 \text{ км/с}$ ), за исключением трех небольших участков: (1)  $v_p = 330 - 400 \text{ км/с}$  и  $n \geq 30 \text{ см}^{-3}$ , (2)  $v_p = 450 - 500 \text{ км/с}$  и  $n = 20 - 30 \text{ см}^{-3}$  и (3)  $v_p \geq 550 \text{ км/с}$  и  $n \geq 8 \text{ см}^{-3}$ . В широком диапазоне скоростей  $v_p = 360 - 600 \text{ км/с}$  отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов уменьшается от  $\sim 6$  до  $\sim 3$  при увеличении концентрации солнечного ветра от  $\sim 2$  до  $\sim 30 \text{ см}^{-3}$ .

## 4.2.2 Обсуждение результатов

Как отмечалось в начале главы, крупномасштабная картина распределения на плоскости  $n - v_p$  основных гидродинамических параметров и относительного содержания ионов солнечного ветра отражает структуру как солнечного ветра, так и солнечной короны. Анализ распределений на этой плоскости модуля магнитного поля  $B$ , температуры протонов  $T_p$ , отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  и относительного содержания гелия  $n_\alpha/n_p$ , которые отражают происхождение наблюдаемых течений, позволяет выделить



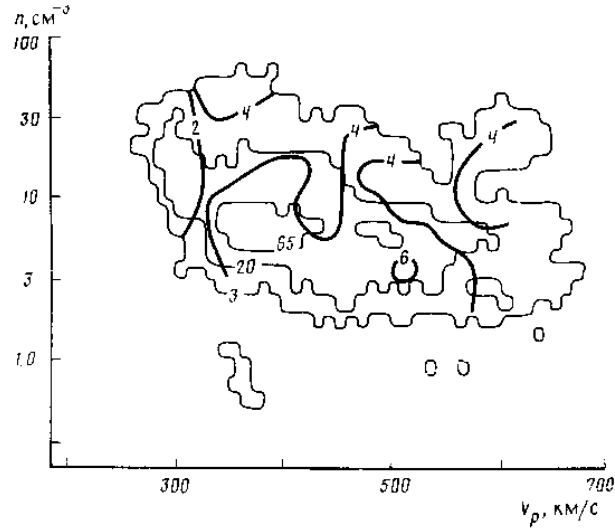


Рис. 4.6: Распределения на плоскости  $n - v_p$  (концентрация - скорость) отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  (жирная линия) и числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

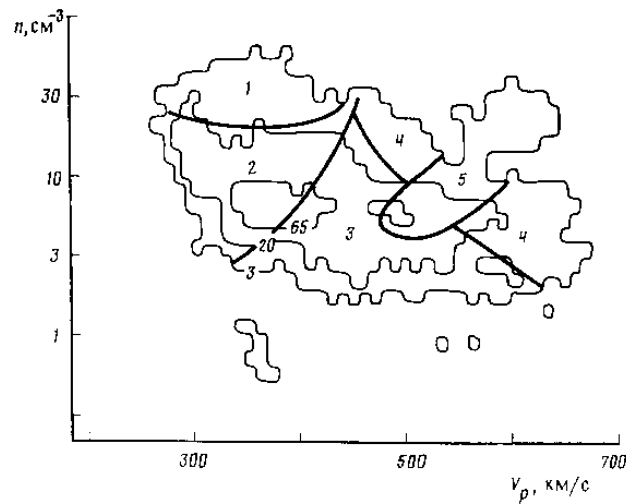


Рис. 4.7: Распределения на плоскости  $n - v_p$  (концентрация - скорость) разных типов солнечного ветра (жирная линия), числа измерений  $N$  в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника *Прогноз 7* [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991].

на плоскости  $n-v_p$  пять характерных областей, показанных на Рис. 4.7 цифрами от 1 до 5 и содержащих соответственно 7, 42, 38, 7 и 6% от общего числа измерений в солнечном ветре на спутнике *Прогноз-7*.

Область 1 характеризуется низкой скоростью ( $v_p \approx 300 - 425$  км/с) и высокой концентрацией ( $n \approx 15 - 50$  см<sup>-3</sup>), значениями  $\beta \geq 1$  и более низкими значениями температуры, магнитного поля и относительного содержания  $\alpha$ -частиц. Величина и поведение гидродинамических параметров протонов и относительного содержания  $\alpha$ -частиц хорошо согласуются с результатами наблюдений на спутниках серий *Vela* и *IMP* [85, 109, 127, Borrini et al., 1981; Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981] в гелиосферных токовых слоях, которые идентифицировались по изменению направления межпланетного магнитного поля, а также теоретическими оценками [99, Eselevich and Fillipov, 1988]. Уменьшение  $B$  и  $T_p$  может быть вызвано аннигиляцией магнитного поля и попаданием холодной и низкоскоростной плазмы в этот диапазон скоростей в результате пересоединения магнитного поля в гелиосферном токовом слое, когда происходит ускорение плазмы на величину порядка альвеновской скорости (в данном диапазоне параметров альвеновская скорость составляет  $\sim 30$  км/с).

Область 2 характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 275 - 450$  км/с) и сравнительно высокой концентрацией ( $n = 2 - 20$  см<sup>-3</sup>, средняя величина  $n \sim 12$  см<sup>-3</sup>), значениями  $\beta < 1$ , средним магнитным полем (возрастающим от  $\sim 5$  до  $\sim 10$  нТ при увеличении концентрации и скорости), низкой температурой протонов (возрастающей от  $\sim 2 \cdot 10^4$  до  $\sim 8 \cdot 10^4$  К при увеличении скорости) и низким относительным содержанием  $\alpha$ -частиц (возрастающим от  $\sim 0.7$  до  $\sim 5\%$  при увеличении скорости и уменьшении концентрации). Результаты измерений параметров плазмы на спутнике *Прогноз 7* в области 2 также хорошо согласуются с результатами измерений на спутниках серий *Vela* и *IMP* [85, 109, 127, Borrini et al., 1981; Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981] в областях низкоскоростного солнечного ветра.

Согласно модели [159, Leer and Holzer, 1980] такие медленные, холодные и достаточно плотные течения, которые наблюдаются в областях 1 и 2, могут образовываться, когда источники дополнительной энергии расположены ниже критической высоты (или отсутствуют вовсе). Это, в частности, возможно в частях солнечной короны с замкнутым магнитным полем, где критическая высота, по-видимому, расположена выше, чем в частях с открытым магнитным полем [29, Ермолаев и Ступин, 1990]. Уменьшение относительного содержания гелия может быть связано с различной скоростью диффузии протонов и  $\alpha$ -частиц поперек корональных магнитных силовых линий в области стримеров [109, 127, 259, 23, Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981; Zastenker et al., 1989; Ермолаев, 1988] или стратификацией ионов в гравитационном поле Солнца в соответствии с их массами. Средние значения параметров  $n$  и  $v_p$  для шести (1.5 - 3)-суточных интервалов с низкой и средней скоростью солнечного ветра, в которых с помощью спутника *Прогноз-7* надежно регистрировались потоки

малых ионных составляющих: гелия, кислорода, кремния и железа (см. главу 5 и ссылки [259, 28, Застенкер и др., 1989; Ермолаев и Застенкер, 1990]) свидетельствуют, что 3 события попадают в область 2, 2 - в область 1 и 1 событие ( $v_p \approx 450$  км/с и  $n \approx 7.3$  см<sup>-3</sup>) - в область 3 (см. подробнее в главе 5). Анализ всех этих событий показал, что относительное содержание гелия (см. Рис. 4.4) в среднем изменяется мало (менее 20%), данные для события из области 3 оказались близкими для события из области 2 со средними параметрами  $v_p \approx 370$  км/с и  $n \approx 11$  см<sup>-3</sup> и не внесли существенного изменения в указанную зависимость. Поэтому можно сделать вывод, что поведение относительного содержания кислорода, кремния и железа в течениях солнечного ветра, истекающих из стримеров, также согласуются с качественной моделью [109, 127, 259, 23, Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981; Zastenker et al., 1989; Ермолаев, 1988].

Область 3 характеризуется средней и высокой скоростью ( $v_p \approx 350 - 600$  км/с) и средней концентрацией ( $n \approx 2 - 20$  см<sup>-3</sup>, средняя величина  $\sim 7$  см<sup>-3</sup>), значениями  $\beta < 1$ , средним магнитным полем (возрастающим от  $\sim 4$  до  $\sim 9$  нТ при увеличении концентрации), средней и высокой температурой (возрастающей от  $\sim 5 \cdot 10^4$  до  $\sim 15 \cdot 10^4$  К при увеличении скорости) и высоким содержанием гелия (слабо возрастающим от  $\sim 4$  до  $\sim 6\%$  при возрастании концентрации и скорости, а также величины потока). Такие быстрые, горячие и разреженные течения могут образовываться, когда источники дополнительной энергии расположены выше критической высоты [159, Leer and Holzer, 1980]. Это, по-видимому, реализуется в течениях из областей с открытыми корональными магнитными полями (из корональных дыр) [154, 184, 217, 207, 29, Krieger et al., 1973; Nolte et al., 1976; Sheeley et al., 1976; Rosner and Vaiana, 1977; Ермолаев и Ступин, 1990].

Увеличение относительного содержания гелия при увеличении потока (в области низких потоков  $nv_p < 3 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup>с<sup>-1</sup>) согласуется с результатами селективных измерений на спутнике *Explorer 34* [185, Ogilvie, 1972]. Такое поведение относительного содержания гелия может быть связано с вытягиванием малых ионных составляющих основным потоком плазмы из короны в межпланетное пространство за счет сил трения, когда величина потока превышает некоторый порог [121, Geiss et al., 1970]. Данные спутника *Прогноз 7* свидетельствуют, что указанный в работе [121, Geiss et al., 1970] механизм реализуется только в течениях области 3, т.е. истекающих из корональных дыр [29, Ермолаев и Ступин, 1990].

Области 4 и 5 непосредственно примыкают к области 3 со стороны более высоких скоростей и концентраций, причем границы как между ними и областью 3, так и между областями 4 и 5 не проявляются достаточно резко, а концентрация для некоторых событий типа 5 не отличается от концентрации для событий типа 3 (различия имеются только в значениях содержания гелия и параметра  $\beta$ ). Более высокие значения концентрации, скорости, температуры и магнитного поля в областях 4 и 5 могут указывать на то, что в этих областях

регистрируются течения, сжатые и ускоренные прохождением межпланетных возмущений, включая межпланетные ударные волны [75, Bame et al., 1979]. В частности, в области  $v_p = 540 - 650$  км/с и  $n = 7 - 40$  см<sup>-3</sup> содержится около 300 отдельных измерений (~40 ч наблюдений), из них 91% связан с прохождением межпланетных ударных волн и/или с внезапным началом геомагнитных возмущений SSC (т.е. со скачком давления в солнечном ветре). В области более низких скоростей и концентраций доля таких мощных возмущений заметно снижается. Таким образом, в отличие от областей 1, 2 и 3, которые являются проявлением на гелиоцентрических расстояниях 1 а.е. стационарных структур солнечной короны (т.е. таких образований, которые не изменяются на временных масштабах, сравнимых с временем распространения течений от Солнца до Земли), области 4 и 5 служат проявлением динамических процессов в солнечной короне и межпланетной среде.

Различия между областями 4 и 5, заключающиеся в более низких значениях температуры и параметра  $\beta$  и более высоких значениях относительного содержания гелия в области 5, по-видимому, связаны с положением спутника относительно меридиана возмущения (транзиенты, выбросы корональной массы, вспышки и т.п.) на Солнце: измерения в области 5 соответствуют периоду наблюдений, когда спутник располагается на меридиане выброса и, в частности, поэтому в ряде случаев регистрируется выброшенное из Солнца вещество (более холодная плазма с высоким содержанием гелия), а измерения в области 4 соответствуют регистрации плазмы того же происхождения, что и в областях 1 - 3, но сжатой и ускоренной при прохождении межпланетных возмущений, таких как межпланетные ударные волны (IS) и/или области взаимодействия разноскоростных течений (CIR).

На Рис. 3.14 и 4.1-4.7 есть указания на еще одну область, которая характеризуется низкой скоростью 300-400 км/с и крайне низкой плотностью  $n = 0.2 - 1.0$  см<sup>-3</sup>, значением  $\beta < 0,3$ , средними значениями температуры, магнитного поля и содержания гелия. Статистика наблюдений такого типа течения солнечного ветра крайне мала (два интервала 04.11.78 21 UT - 05.11.78 02 UT и 03.02.79 15-19 UT, причем магнитогидродинамические параметры удалось определить лишь для ~60 отдельных 4-минутных точек), поэтому репрезентативные оценки могут быть получены лишь для некоторых параметров и, к сожалению, более подробный анализ для этого типа по нашим данным невозможен, и мы вынуждены ограничиться лишь приведенными данными. Единственно, что можно отметить, так это невозможность объяснить такой набор параметров исключительно структурой крупномасштабных корональных полей (с помощью моделей типа [159, Leer and Holzer, 1980]): в данном случае необходимо привлекать для объяснения этого явления динамические процессы в межпланетном пространстве противоположные наблюдаемым в CIR, когда впереди медленного течения распространяется быстрое течение, в результате чего объем плазмы испытывает сильное разрежение [239, Usmanov et al., 2000]. В последнее время (особенно после

публикации работ по событию 10-11 мая 1999 г. - см. специальный выпуск журнала *Geophys.Res.Lett.*, v.27, N 13, 2000 и в частности работы [239, 204, 158, Usmanov et al., 2000; Richardson et al., 2000; Le et al., 2000]) к течениям такого рода резко возросло внимание и прежде всего в связи с изучением их воздействия на магнитосферу Земли [158, 255, Le et al., 2000; Ермолаев и др., 2000].

Проведенная выше идентификация 5 различных областей на плоскости  $n-v_p$  позволяет сделать определенные выводы о том, что относительное поведение переносных скоростей и кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов, отражающее в основном динамику плазмы в межпланетном пространстве, связано в определенной мере с типами течений солнечного ветра. Процессы преимущественного ускорения и нагрева  $\alpha$ -частиц ( $v_\alpha > v_p$  и  $T_\alpha > 4T_p$ ) наблюдаются на границе областей гелиосферного токового слоя и течений из частей короны с замкнутым магнитным полем (из стримеров), а также в течениях из корональных дыр, причем неравновесные состояния усиливаются при уменьшении концентрации в области 3. Такая антикорреляция с плотностью может быть связана с тем, что при уменьшении концентрации уменьшается число столкновений ионов между собой.

В низкоскоростной ( $v_p < 330$  км/с) части области 2, а также в областях 4 и 5  $\alpha$ -частицы в среднем движутся медленнее, чем протоны, и отношение температур  $\alpha$ -частиц и протонов меньше 4. По-видимому, в этих областях механизмы преимущественного ускорения и нагрева  $\alpha$ -частиц отсутствуют или подавляются механизмами, приводящими к противоположному результату. Возможно также, что соотношение между скоростями и температурами ионных составляющих определяется простым перераспределением энергии в многокомпонентной плазме. Однако необходимо отметить тот факт, что в медленном, плотном и холодном солнечном ветре в области 2, где велики число и эффективность кулоновских столкновений [243, 25, Yermolaev, 1991; Ермолаев, 1994], переносные и тепловые скорости ионных составляющих не равны.

Средние значения параметров в области высокоскоростных течений  $v_p \geq 550$  км/с в условиях сравнительно небольшой статистики в основном определяются относительной долей значений из трех различных областей 3, 4 или 5. Например, даже сравнительно небольшое количество измерений в области 4 (~15% измерений в указанном диапазоне скоростей) привело к заметному увеличению средней концентрации в этом диапазоне скоростей (по сравнению со средним законом  $n \sim v_p^{-2}$  - см. раздел 3.3), а малое число событий в области 5 (по сравнению с числом событий в области 4) с высоким содержанием гелия стало причиной уменьшения средней величины относительного содержания гелия. Аналогичным образом уменьшение средней разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов может быть связано с более высокой долей течений в области 4 по сравнению с областью 3. Отчасти уменьшение разности скоростей может происходить за счет перемешивания

разноскоростных течений с различным относительным содержанием гелия [101, 13, Eyni and Steinitz, 1977; Веселовский, 1978], уменьшение  $n_\alpha/n_p$  при увеличении скорости  $v_p$ . Низкая доля течений области 3 в этом диапазоне скоростей и, в частности, отсутствие течений из корональных дыр со скоростями более 650 км/с, по-видимому, связаны с отсутствием в период 1978 - 1979 гг. корональных дыр с большой площадью [98, Eselevich and Fainshtein, 1989].

### 4.2.3 Средние значения параметров в разных типах течений солнечного ветра

Полученные выше результаты позволяют провести анализ по идентификации различных типов течений солнечного ветра. Интервалы времени для пяти типов течений солнечного ветра были первоначально опубликованы нами в работе [30, Ермолаев и Ступин, 1992] (см. Табл. 4.1). Позже в работе [26, Ермолаев, 1995] были повторно проанализированы данные, связанные с четвертым и пятым типами течений, и были представлены уточненные интервалы. Большая часть интервалов МС совпала с наблюдениями на космическом аппарате *ISEE 3* двунаправленных надтепловых электронных потоков, которые были идентифицированы авторами как выбросы корональной массы [128, Gosling et al., 1987] (см. Табл. 4.2). Такая селекция данных позволяет провести определение характерных для каждого из типов течений значений различных физических параметров. В частности в Табл. 4.3 приведены средние значения основных параметров.

Необходимо отметить, что эти результаты получены по измерениям на спутнике *Прогноз 7* за приблизительно 8 месяцев работы в 1978-1979 г., т.е. на сравнительно небольшом участке возрастающей ветки 21-го цикла солнечной активности. Кроме того последняя строчка таблицы показывает, что доля (или статистика) наблюдений 1-го, 4-го и 5-го типов солнечного ветра заметно меньше, чем 2-го и 3-го типов, поэтому представленные результаты требуют дальнейшего изучения, и прежде всего с учетом изменений в солнечном цикле.

С учетом сделанных выше замечаний можно отметить, что для идентификации типов течений солнечного ветра по минимальному набору данных достаточно определить скорость, концентрацию, относительное содержание  $\alpha$ -частиц и отношения теплового давления к магнитному (параметра  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ ), так как в четырехмерном пространстве эти 4 параметра для различных типов течений солнечного ветра занимают определенные области, которые практически не пересекаются.

Таблица 4.1: Интервалы наблюдений различных типов течений солнечного ветра в период работы ИСЗ *Прогноз 7*

NN	Интервал Дата/Час(UT)	Тип СВ	NN	Интервал Дата/Час(UT)	Тип СВ	NN	Интервал Дата/Час(UT)	Тип СВ
	1978		42	21.12/04-21.12/17	3	83	23.03/02-23.03/08	3
1	04.11/16-05.11/02	3	43	23.12/06-24.12/17	3	84	24.03/04-25.03/15	3
2	05.11/03-06.11/08	2	44	25.12/01-25.12/02	3	85	28.03/04-28.03/07	3
3	12.11/07-12.11/15	5	45	25.12/03-25.12/07	2	86	28.03/14-28.03/16	4
4	12.11/18-12.11/23	4		1979		87	28.03/17-28.03/23	5
5	13.11/00-13.11/05	3	46	02.01/13-02.01/21	3	88	29.03/00-29.03/11	5
6	13.11/11-13.11/12	3	47	05.01/13-06.01/22	3	89	04.04/12-04.04/13	3
7	16.11/20-17.11/01	3	48	06.01/23-07.01/00	5	90	04.04/19-05.04/01	3
8	17.11/02-17.11/17	2	49	07.01/01-07.01/03	4	91	05.04/02-05.04/03	4
9	18.11/03-18.11/05	2	50	08.01/15-10.01/07	3	92	05.04/04-05.04/12	5
10	20.11/08-20.11/15	4	51	12.01/14-15.01/08	1	93	05.04/15-05.04/16	4
11	20.11/16-20.11/19	4	52	16.01/18-16.01/21	3	94	06.04/02-06.04/05	4
12	20.11/20-20.11/23	5	53	17.01/01-18.01/07	3	95	06.04/08-06.04/12	4
13	21.11/00-21.11/07	4	54	20.01/21-22.01/15	3	96	08.04/14-08.04/15	3
14	21.11/08-22.11/05	3	55	22.01/16-22.01/21	2	97	08.04/18-08.04/23	3
15	22.11/09-22.11/15	4	56	22.01/22-23.01/09	3	98	09.04/05-09.04/11	3
16	24.11/17-24.11/20	3	57	25.01/13-26.01/08	4	99	09.04/12-10.04/08	2
17	25.11/10-25.11/13	3	58	26.01/09-27.01/10	3	100	12.04/20-13.04/07	3
18	25.11/14-25.11/17	4	59	29.01/04-29.01/11	4	101	13.04/13-14.04/01	5
19	28.11/18-29.11/06	3	60	31.01/10-31.01/16	3	102	14.04/02-14.04/11	3
20	29.11/10-29.11/23	3	61	03.02/12-03.02/18	3	103	14.04/12-15.04/02	5
21	30.11/00-30.11/20	2	62	03.02/20-03.02/22	4	104	17.04/03-17.04/10	4
22	30.11/21-01.12/01	2	63	03.02/23-04.02/01	3	105	17.04/11-19.04/05	3
23	02.12/14-02.12/18	1	64	04.02/02-04.02/08	2	106	25.04/00-25.04/13	5
24	02.12/19-03.12/11	2	65	04.02/09-04.02/20	3	107	25.04/14-25.04/23	4
25	03.12/12-03.12/18	1	66	06.02/01-08.02/19	2	108	26.04/00-26.04/09	3
26	03.12/19-04.12/03	1	67	13.02/23-14.02/15	2	109	26.04/21-26.04/22	3
27	04.12/04-04.12/13	2	68	16.02/10-16.02/19	2	110	27.04/04-27.04/06	5
28	04.12/14-04.12/18	3	69	21.02/04-21.02/07	3	111	29.04/02-29.04/23	4
29	04.12/19-05.12/06	5	70	27.02/08-28.02/20	3	112	30.04/00-30.04/15	5
30	11.12/00-12.12/02	2	71	28.02/21-01.03/06	3	113	30.04/16-30.04/20	3
31	12.12/03-13.12/00	1	72	02.03/22-04.03/22	2	114	30.04/21-01.05/06	3
32	13.12/01-13.12/06	2	73	04.03/23-05.03/08	3	115	03.05/21-05.05/05	2
33	14.12/20-14.12/21	5	74	07.03/11-08.03/11	3	116	07.05/17-09.05/05	2
34	14.12/22-14.12/23	3	75	08.03/12-09.03/02	2	117	09.05/06-09.05/08	3
35	15.12/00-15.12/04	4	76	09.03/03-09.03/12	2	118	11.05/04-13.05/09	3
36	15.12/05-16.12/22	3	77	10.03/16-10.03/17	3	119	15.05/23-17.05/05	3
37	16.12/23-17.12/07	2	78	11.03/05-13.03/10	3	120	25.05/09-25.05/11	4
38	17.12/08-17.12/18	3	79	15.03/00-15.03/06	2	121	27.05/21-28.05/06	3
39	17.12/19-17.12/21	1	80	19.03/08-20.03/05	3	122	29.05/19-30.05/00	4
40	19.12/00-19.12/18	4	81	20.03/06-20.03/18	2	123	04.06/19-05.06/20	2
41	20.12/07-21.12/03	4	82	20.03/19-21.03/16	2			

Таблица 4.2: Интервалы наблюдений 4 и 5 типов потоков солнечного ветра в период работы ИСЗ *Прогноз 7*

NN	Интервал Дата/Час(UT)	Тип CB	ISEE
1978			
1	12.11/07-12.11/15	4	+
2	12.11/18-13.11/11	5	
3	20.11/08-20.11/18	3	
4	20.11/20-21.11/07	4	
5	04.12/19-05.12/06	4	
6	14.12/20-14.12/23	4	
7	16.12/03-17.12/00	3	
8	19.12/00-19.12/18	4	
9	20.12/07-21.12/03	4	
1979			
10	06.01/02-07.01/00	4	+
11	07.01/01-07.01/03	5	
12	08.01/15-09.01/03	5	
13	09.01/04-09.01/21	4	+
14	25.01/13-26.01/08	4	
15	26.01/09-27.01/04	5	
16	23.03/02-23.03/08	5	+
17	24.03/08-24.03/22	5	
18	28.03/14-29.03/04	4	
19	29.03/08-29.03/14	5	+
20	04.04/12-05.04/01	5	
21	05.04/02-06.04/12	4	
22	09.04/05-09.04/13	5	+
23	13.04/13-14.04/12	5	
24	14.04/13-15.04/02	4	
25	17.04/03-17.04/23	4	+
26	25.04/00-25.04/08	4	
27	24.04/09-26.04/09	5	
28	29.04/02-30.04/02	4	
29	30.04/03-30.04/14	5	
30	25.05/09-25.05/11	4	
31	29.05/19-29.05/22	4	



Таблица 4.3: Средние параметры плазмы и ММП в 5 типах течений солнечного ветра

Параметры	Типы потоков солнечного ветра				
СВ	HCS	CS	CH	CIR	MC
$V_p$ , км/с	$351 \pm 45$	$359 \pm 33$	$449 \pm 52$	$539 \pm 84$	$504 \pm 67$
$T_p$ , $10^4$ К	$5.3 \pm 4.4$	$5.4 \pm 5.1$	$9.8 \pm 8.5$	$19.8 \pm 13.6$	$6.7 \pm 6.2$
$n_p$ , $\text{см}^{-3}$	$29.6 \pm 10.0$	$9.6 \pm 4.2$	$6.1 \pm 3.4$	$8.2 \pm 6.1$	$6.3 \pm 2.8$
$B$ , нТ	$6.3 \pm 2.3$	$7.2 \pm 3.0$	$6.9 \pm 2.7$	$10.3 \pm 6.6$	$10.2 \pm 5.2$
$v_A$ , км/с	$28 \pm 9$	$53 \pm 19$	$66 \pm 24$	$67 \pm 23$	$91 \pm 35$
$\beta_p$	$2.0 \pm 1.7$	$0.5 \pm 0.6$	$0.6 \pm 0.6$	$1.0 \pm 0.8$	$0.3 \pm 0.3$
$n_p v_p$ , $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$10.5 \pm 3.9$	$3.4 \pm 1.4$	$2.7 \pm 1.5$	$4.2 \pm 3.1$	$3.1 \pm 1.4$
$m_p n_p v_p^2$ , $10^{-8} \text{ дин/см}^2 \text{ с}$	$6.3 \pm 2.2$	$2.1 \pm 1.0$	$2.1 \pm 1.2$	$3.7 \pm 3.0$	$2.6 \pm 1.3$
$m_p n_p v_p^3/2$ , эрг/см $^2$ с	$1.13 \pm 0.56$	$0.38 \pm 0.20$	$0.47 \pm 0.28$	$1.00 \pm 0.92$	$0.68 \pm 0.38$
$n_\alpha/n_p$ , %	$1.7 \pm 2.6$	$4.7 \pm 6.6$	$6.6 \pm 8.0$	$3.4 \pm 4.2$	$10.5 \pm 10.1$
$ v_\alpha  -  V_p $ , км/с	$1 \pm 18$	$-1 \pm 19$	$9 \pm 22$	$-2 \pm 24$	$1 \pm 21$
$\frac{ v_\alpha  -  v_p }{V_A}$	$0.03 \pm 0.70$	$0.03 \pm 0.40$	$0.12 \pm 0.38$	$-0.03 \pm 0.27$	$0.03 \pm 0.32$
$v_\alpha/v_p$	$1.001 \pm 0.05$	$0.996 \pm 0.05$	$1.020 \pm 0.05$	$0.995 \pm 0.06$	$1.004 \pm 0.05$
$T_\alpha/T_p$	$2.7 \pm 3.0$	$4.2 \pm 3.6$	$4.4 \pm 3.0$	$3.3 \pm 2.6$	$3.9 \pm 2.8$
$\tau_e/\tau_s$	$1.11 \pm 1.27$	$0.31 \pm 0.62$	$0.06 \pm 0.20$	$0.02 \pm 0.03$	$0.13 \pm 0.35$
$\tau_e/\tau_c$	$2.43 \pm 2.60$	$0.64 \pm 1.26$	$0.10 \pm 0.32$	$0.04 \pm 0.06$	$0.21 \pm 0.52$
время наблюдения, %	8	33	49	6	4

HCS - heliospheric current sheet

CS - coronal streamer

CH - coronal hole

CIR - corotating interaction region

MC - magnetic cloud

## 4.3 Выводы

Результаты селективных измерений параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра, а также межпланетного магнитного поля на спутнике *Прогноз 7*, представленные в виде двумерных зависимостей от переносной скорости  $v_p$  и концентрации  $n$  солнечного ветра, позволили выделить на плоскости "концентрация - скорость" ( $n-v_p$ ) шесть различных областей, соответствующих различным типам течений:

- область 1 характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 300 - 420$  км/с) и высокой концентрацией ( $n = 15 - 50$  см $^{-3}$ ), отношением теплового давления к магнитному  $\beta > 1$  и низкими значениями температуры протонов, относительного содержания гелия и модуля магнитного поля,
- область 2 характеризуется также низкой скоростью ( $v_p = 270 - 450$  км/с) и средней концентрацией ( $n = 2 - 20$  см $^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , низкими температурой и относительным содержанием гелия и средним магнитным полем,
- область 3 характеризуется средней и высокой скоростью ( $v_p = 350 - 650$  км/с) и средней концентрацией ( $n = 2 - 30$  см $^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , средними температурой и магнитным полем и высоким содержанием гелия,
- область 4 характеризуется высокой скоростью ( $v_p = 450 - 700$  км/с) и средней концентрацией ( $n = 3 - 30$  см $^{-3}$ ), значениями  $\beta \sim 1$ , высокими значениями температуры и магнитного поля, низким содержанием гелия,
- область 5 характеризуется высокой скоростью ( $v_p = 500 - 700$  км/с) и средней концентрацией ( $n = 5 - 30$  см $^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , средними значениями температуры и высокими значениями магнитного поля и содержания гелия.
- область 6 характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 350 - 400$  км/с) и очень низкой концентрацией ( $n = 0,2 - 1$  см $^{-3}$ ), значением  $\beta < 0,3$ , средними значениями температуры, магнитного поля и содержания гелия (из-за малой статистики наблюдений большинство характеристик и соотношений между ними с достаточной точностью определить не удалось).

Величина и различный характер поведения указанных параметров на плоскости "концентрация - скорость"  $n-v_p$  позволяют сопоставить первые пять областей с известной крупномасштабной структурой и динамикой солнечной короны и гелиосферы:

1. гелиосферный токовый слой,

2. течения из областей с замкнутыми линиями коронального магнитного поля (из стримеров),
3. течения из областей с открытым магнитным полем (из корональных дыр),
4. солнечный ветер, возмущенный нестационарными явлениями в солнечной короне и в солнечном ветре (CIR),
5. течения, содержащие выброшенное из солнечной короны вещество (магнитное облако).

Явления с крайне низкой концентрацией солнечного ветра, по-видимому, связаны с динамическими процессами в межпланетном пространстве противоположными наблюдаемым в CIR, когда впереди медленного течения распространяется быстрое течение, в результате чего объем плазмы испытывает сильное разрежение [239, Usmanov et al., 2000].

В течениях из стримеров (область 2) относительное содержание гелия уменьшается с возрастанием концентрации, и эта зависимость согласуется с качественной моделью [127, Gosling et al., 1981]. В течениях из корональных дыр (область 3) относительное содержание гелия возрастает при увеличении концентрации и величины потока. Этот факт согласуется как с результатами наблюдений на спутнике *Explorer 34* в области малых величин потока [185, Ogilvie, 1972], так и с моделью [121, Geiss et al., 1970]. Течения с положительной разностью переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p > 0$  занимают на плоскости "концентрация - скорость"  $n - v_p$  часть, включающую границу между областями 1 и 2, между 2 и 3 и область 3 с низкой концентрацией ( $n < 12 \text{ см}^{-3}$ ), при этом в области 3 разность скоростей возрастает до  $\sim 30 \text{ км/с}$  при уменьшении концентрации. В областях 2, 4 и 5  $\alpha$ -частицы в среднем движатся медленнее протонов.

Потоки с отношением температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p > 4$  расположены в области 1 на границе областей 2 и 3 и в области 3, при этом в области 3 отношение температур в среднем возрастает до  $\sim 5$  при уменьшении концентрации. В областях 2, 4 и 5 отношение температур в среднем меньше 4.

## Глава 5

# Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в поведении ионных компонент

В настоящей главе приводится подробная информация о распределениях (гистограммах) ряда параметров солнечного ветра и их зависимостях между собой, при этом основное внимание уделяется относительному поведению  $\alpha$ -частиц и более тяжелых ионов в разных типах течений солнечного ветра.

### 5.1 Потоки массы, импульса и энергии в разных типах течений солнечного ветра

Поток энергии плазмы и магнитного поля солнечного ветра в среднем на 6 порядков ниже потока энергии электромагнитного излучения, исходящего в основном из фотосферы Солнца в видимом диапазоне длин волн. Однако потери Солнцем массы главным образом приходятся именно на солнечный ветер (см. например, сборник под редакцией О.Уайта, 1977 [52]). Поэтому измерения солнечного ветра позволяют провести прямую регистрацию и диагностику солнечного вещества, в том числе потери Солнцем массы, импульса и энергии в разных типах течений солнечного ветра. В настоящем разделе исследуются гистограммы, средние величины и среднеквадратичные отклонения ряда МГД параметров, включая потоки массы, импульса и энергии в разных типах течений солнечного ветра, наблюдавшихся на спутнике *Прогноз 7* (см. раздел 4.2.1 и таблицы 4.1 и 4.2). Полученные результаты сопоставляются с наблюдениями на других космических аппаратах.

Гистограммы потоков частиц  $nv_p$  (или массы  $m_p nv_p$ ), импульса  $nv_p^2$  ( $m_p nv_p^2$ ), кинетической  $m_p nv_p^3/2$  и тепловой  $nkT_p v_p$  энергии протонов и отношения теплового и магнитного давлений (или плотностей тепловой и магнитной энергии)  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  для пяти типов солнечного ветра показаны на

Рис. 5.1 - 5.5: на верхних панелях - для течений из областей с низкой (тип CS солнечного ветра - сплошная линия) и сверхрадиальной (тип СН - штриховая линия) расходимостью коронального магнитного поля, и на нижних панелях - для гелиосферного токового слоя (тип HCS - сплошная линия), для возмущенного солнечного ветра (тип CIR - штриховая линия) и для плазмы, выброшенной из солнечной атмосферы (тип MC - пунктирная линия). Необходимо отметить, что вертикальный масштаб гистограмм на верхних панелях в несколько раз мельче, чем на нижних панелях из-за разного числа наблюдений в различных типах течений. Средние значения и среднеквадратичные отклонения для каждой из гистограмм, а также их доля от полного числа измерений для каждого типа течений представлены в Табл. 4.3.

Величина потока частиц (Рис. 5.1) в среднем уменьшается в квазистационарных течениях при переходе от типа HCS к типу CS и затем к типу СН, при этом относительная дисперсия (т.е. дисперсия, отнесенная к средней величине) приблизительно постоянная для этих трех типов течений. В то же время распределения в течениях типа CIR и MC заметно более широкие, и хотя положение их максимумов мало отличается от положений максимумов типов CS и СН, средние величины оказываются выше из-за наличия длинных "хвостов" распределений в области высоких значений.

На Рис. 5.2 показаны распределения величины потока импульса или динамического давления (на рисунке представлены две шкалы  $nv_p^2$  и  $m_p nv_p^2$ , отличающиеся числовым множителем). Максимумы распределений и средние величины в течениях типа CS и СН совпадают, в то время как в течении типа HCS они заметно выше. Относительная дисперсия для этих трех типов течений приблизительно постоянна. Для течений типа CIR и MC распределения близки и по положению максимумов, и по ширине, а средние величины оказываются больше, чем положение максимумов из-за наличия длинных "хвостов".

Распределения потоков кинетической энергии  $m_p nv_p^3/2$  показаны на Рис. 5.3. В отличие от потока частиц потоки кинетической энергии в течениях типа СН в среднем больше, чем в течениях типа CS, хотя они оба меньше, чем в течениях типа HCS. Интересно отметить, что гистограммы типов HCS, CIR и MC близки друг к другу по положению средней величины, но отличаются по относительной дисперсии.

Первые три рисунка по существу показывают совокупное распределение концентрации и скорости и отличаются только показателем степени в представлениях  $nv_p$ ,  $nv_p^2$  и  $nv_p^3$  в разных типах солнечного ветра. Для квазистационарных течений типа HCS, CS и СН гистограммы, как правило, имеют достаточно гладкую, колоколообразную форму с явно выраженным максимумом и медленно уменьшающимся "хвостом" в сторону высоких значений (отметим, однако, что с увеличением показателя степени у скорости ширина распределения для течения типа HCS возрастает), а для нестационарных типов CIR и MC - более изрезанные и широкие гистограммы

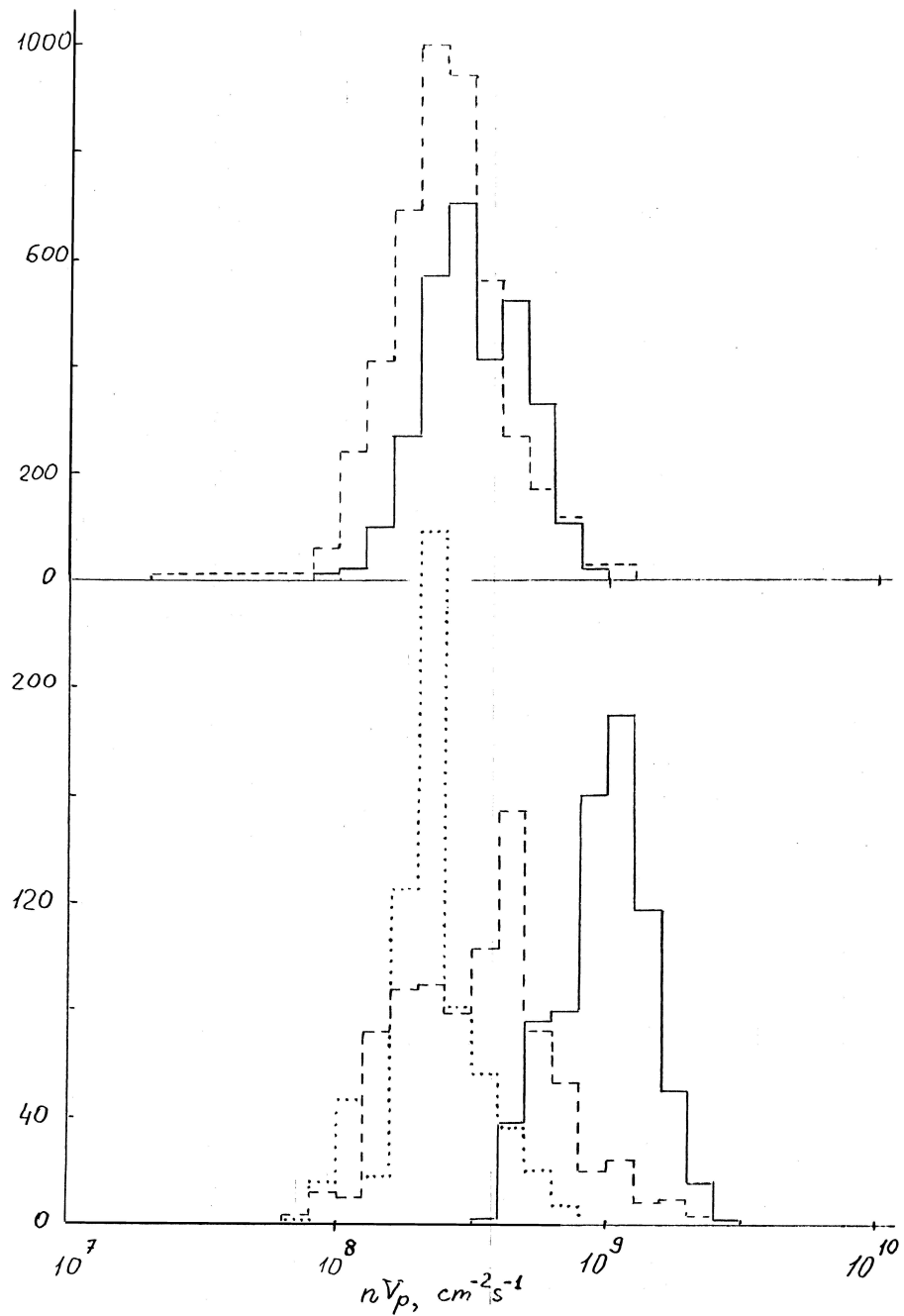


Рис. 5.1: Гистограммы потоков частиц  $nV_p$  для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]: на верхней панели - для течений из областей с низкой (тип CS солнечного ветра - сплошная линия) и сверхрадиальной (тип СН - штриховая линия) расходимостью коронального магнитного поля, и на нижней панели - для гелиосферного токового слоя (тип HCS - сплошная линия), для возмущенного солнечного ветра (тип CIR - штриховая линия) и для плазмы, выброшенной из солнечной атмосферы (тип MC - пунктирная линия).

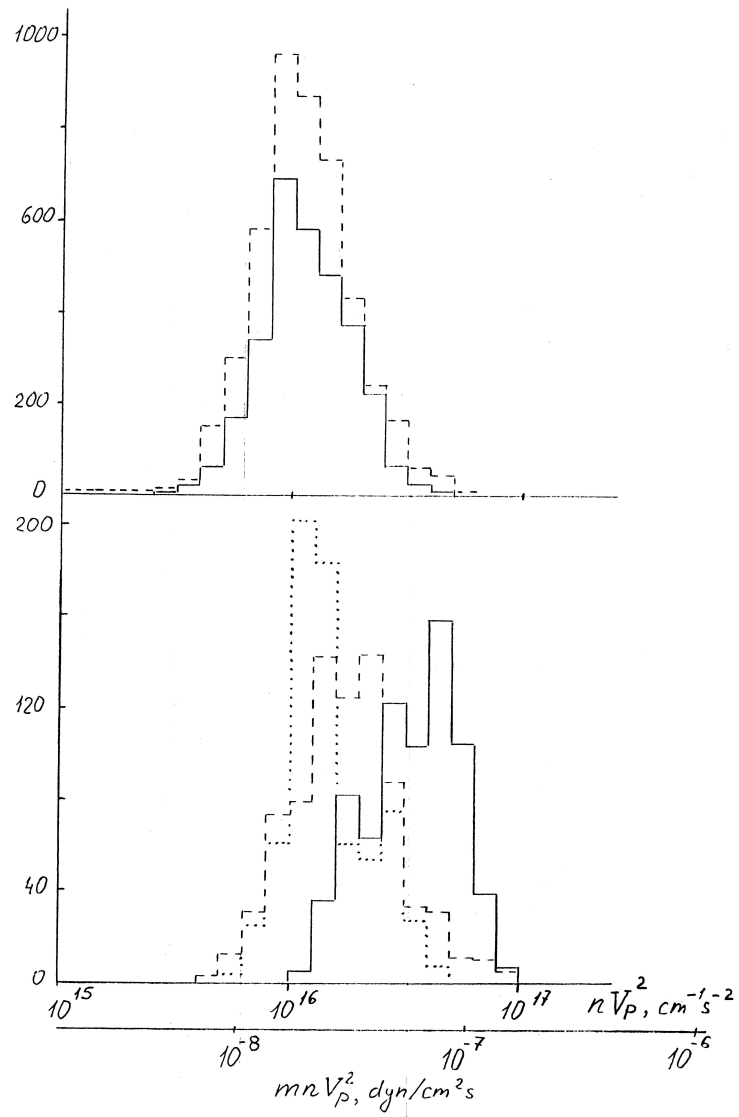


Рис. 5.2: Гистограммы потоков импульса  $nv_p^2$  ( $m_p nv_p^2$ ) для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1.

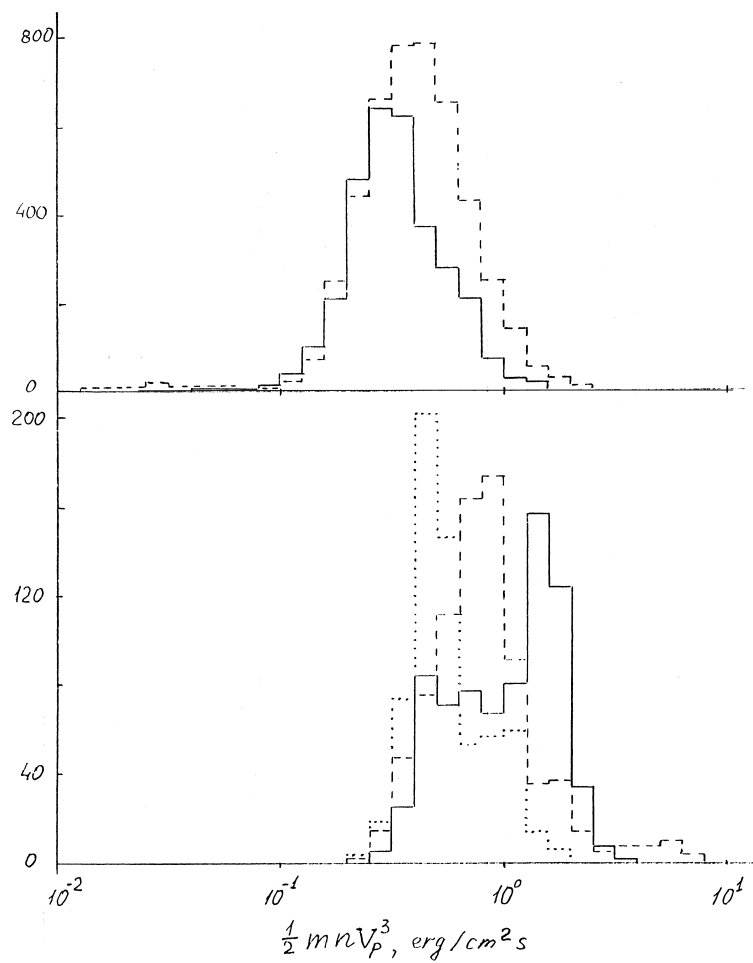


Рис. 5.3: Гистограммы потоков кинетической энергии  $m_p n v_p^3/2$  для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1.



при более низкой статистике наблюдений. В течениях типа CS и CH изменяется соотношение между положением максимумов с ростом показателя степени скорости: величина потока частиц в течениях типа CS больше, чем в течениях типа CH, а величина потока кинетической энергии наоборот, при этом распределения для потоков импульса в обоих типах солнечного ветра совпадают. С увеличением показателя степени скорости распределения в течениях типа CIR и MC смещаются от значений, характерных для распределений в течениях типа CS и CH, в сторону более высоких и достигают на Рис. 5.3 значений, характерных для распределений в течениях типа HCS.

Распределения потоков тепловой энергии для всех типов солнечного ветра оказываются очень широкими (на Рис. 5.4 и 5.5 масштаб шкалы абсцисс сжат по сравнению с предыдущими рисунками), что проявляется в высоких значениях дисперсии, которая во всех случаях близка или даже превышает средние значения. Поэтому следует с известной долей осторожности относиться к вычисленным средним значениям. Распределения для течений типа HCS, CS и CH имеют достаточно хорошо выраженные максимумы, при этом максимум для течения типа HCS имеет более высокое положение по величине потока энергии, чем максимумы распределений для течений типа CS и CH, которые близки между собой, но в целом распределение для течений типа CH несколько смещено в сторону высоких потоков энергии относительно распределения для течений типа CS. Распределения для течений типа CIR и MC более изрезанные и широкие, чем для течений типа HCS, CS и CH, и они в целом демонстрируют, что поток тепловой энергии в нестационарных течениях выше, чем в квазистационарных.

Параметр  $\beta$ , характеризующий не только отношение теплового и магнитного давлений, но и отношение плотности и величины потоков тепловой и магнитной энергии, представлен на Рис. 5.5. Ввиду того, что плазменные и магнитные измерения не всегда проводились на спутнике одновременно, общая статистика измерений параметра  $\beta$  меньше, чем на предыдущих рисунках. Однако имеющаяся статистика позволяет сделать заключение о виде распределений этого параметра в разных типах солнечного ветра. Для всех типов течений распределения оказываются очень широкими и обладают по одному ярко выраженному максимуму. Провал вблизи максимума в распределении  $\beta$  в течениях типа HCS невелик и, по-видимому, носит статистический характер. Более сложную форму имеет распределение для течений типа MC: помимо основного максимума в районе величины 0.5 наблюдается второй локальный максимум (на уровне  $\sim 0.6$  от величины основного максимума) в районе величины 0.08, отделенный широким провалом (на уровне  $\sim 0.4$  от величины основного максимума). На основании имеющихся данных трудно сделать заключение о том, насколько второй максимум статистически достоверен. В целом можно сделать вывод, что наивысшие значения параметра  $\beta$  наблюдаются в течениях типа HCS и CIR, и минимальное – в течениях типа MC.

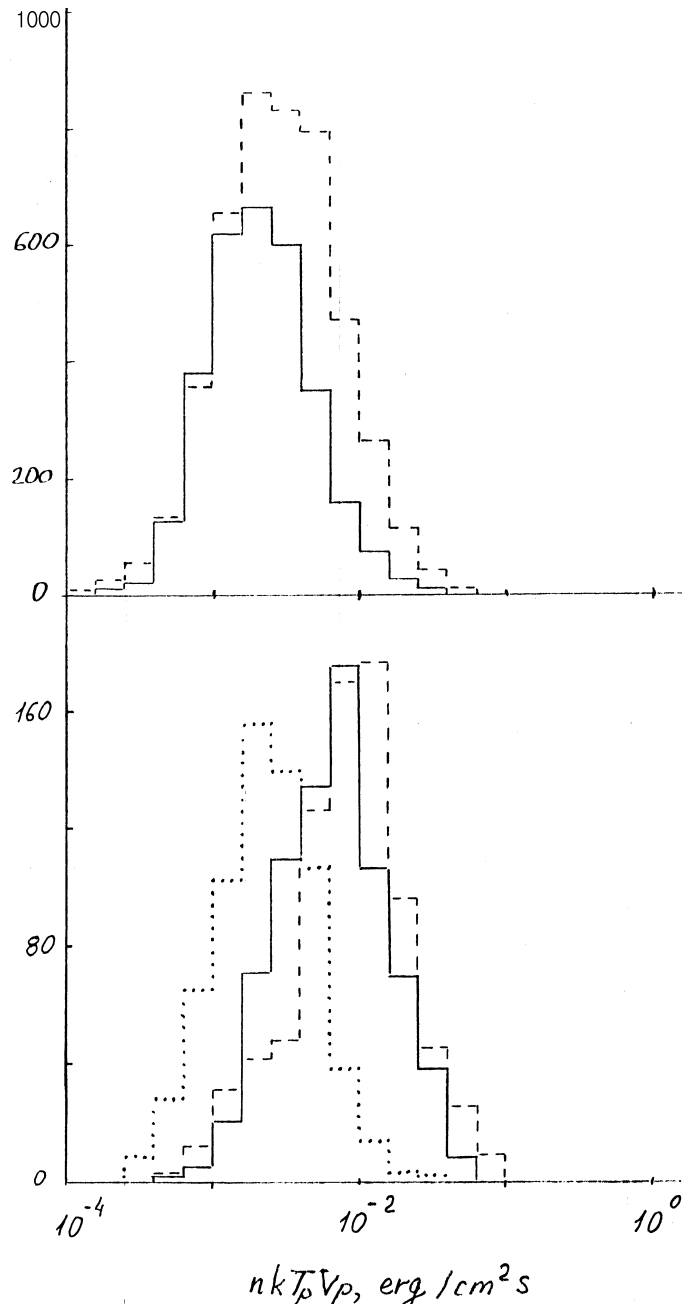


Рис. 5.4: Гистограммы потоков тепловой энергии  $nkT_p v_p$  для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1.

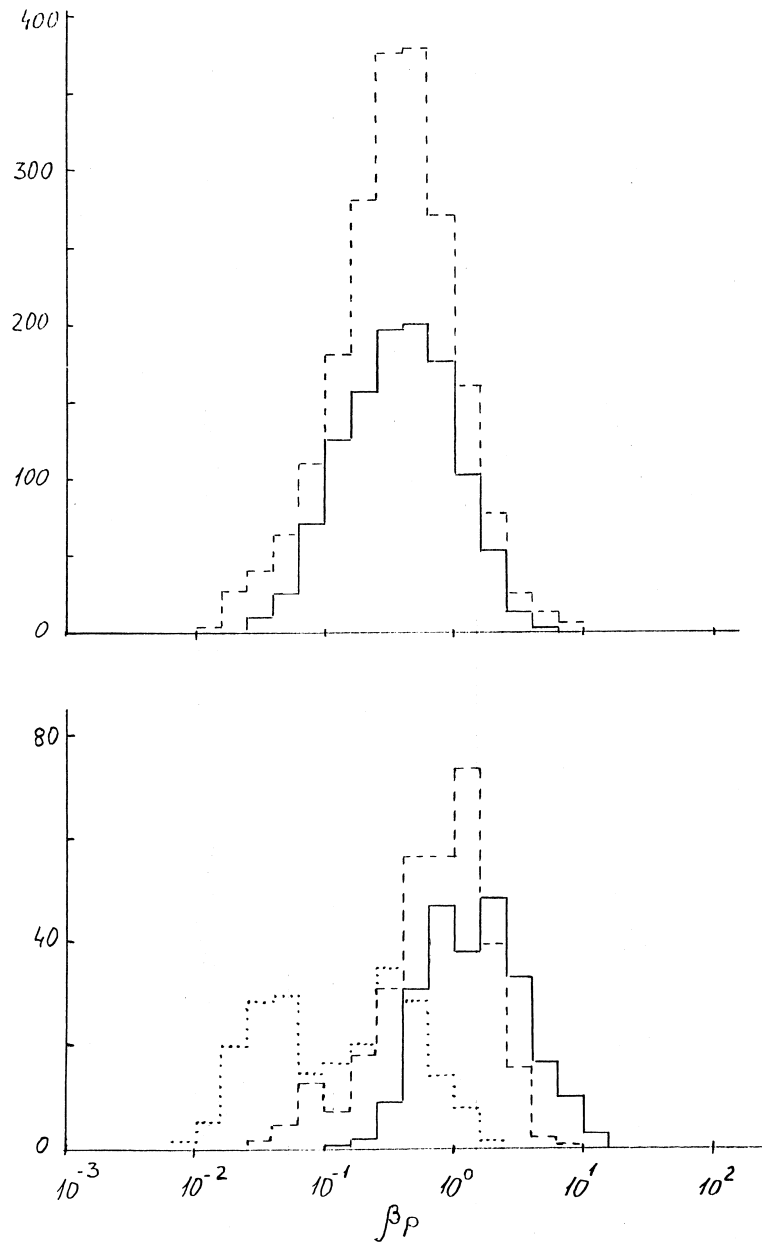


Рис. 5.5: Гистограммы отношения теплового и магнитного давлений (или плотностей тепловой и магнитной энергии)  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1.

Как отмечалось выше, в совокупности данные Рис. 5.1-5.3 характеризуют зависимость между концентрацией и скоростью в разных типах течений солнечного ветра. В разделе 3.3 (см. Табл. 3.7) уже обсуждались некоторые результаты по изучению такой взаимосвязи на различных космических аппаратах.

Представленные на Рис. 5.1 - 5.3 данные показывают, что в наиболее распространенных типах течений из областей как с низкой, так и высокой расходимостью коронального магнитного поля (в сумме более 80% наблюдений) распределения совпадают наилучшим образом для второй степени показателя скорости, т.е. сохраняется поток импульса  $nv_p^2 = const$ , а в остальных типах солнечного ветра связь между концентрацией и скоростью может быть другой и зависит от физических процессов как в области формирования этих типов течений, так и в межпланетном пространстве [159, Leer and Holzer, 1980].

Таблица 5.1 позволяет сравнить средние характеристики параметров, представленных на Рис. 5.1-5.5, с аналогичными характеристиками, полученными в других экспериментах. Так как для некоторых экспериментов данные селектировались по величине скорости, то полезно указать приблизительные интервалы скоростей, где проходят границы между разными типами течений: типы HCS и CS отличаются практически только по величине концентрации, граница между течениями типов CS и CH расположена в диапазоне 400-450 км/с, а течения типов CIR и MC наблюдаются при скоростях более 450 км/с и отличаются от типа CH более высокой концентрацией. Поэтому мы объединили наши данные в 2 группы (см. Табл. 5.1): 1+2 (HCS+CS) типы и 3+4+5 (CH+CIR+MC) типы, при этом можно условно считать, что граница между группами проходит при скорости 400 км/с. Таким образом, лишь в некоторых случаях результаты различных экспериментов для селектированных данных могут быть сравнены между собой, так как не всегда они были получены при одинаковых условиях. Результаты, полученные для течений из корональных стримеров [213, Sastri, 1987], по-видимому, следует сравнивать с низкоскоростными течениями и группой 1+2 типов данных спутника *Прогноз 7*.

Средние потоки частиц для всех экспериментов, представленных в Табл. 5.1, согласуются в пределах среднеквадратичных отклонений. Однако следует отметить более низкие значения, полученные по измерениям на КА *Helios 1,2* [233, 215, Steinitz and Einy, 1980; Schwenn, 1983] и более высокие значения, полученные на спутнике *IMP 8* [162, Lopez, 1987]. Во всех экспериментах поток частиц в медленных течениях выше, чем в быстрых. Учитывая длительность наблюдения разных типов солнечного ветра во время измерений на спутнике *Прогноз 7* в 1978-1979 годах, можно получить оценку, что потери массы Солнцем практически равны в разных типах квазистационарных течений солнечного ветра, они в  $\sim 5$  раз превышают потери массы в возмущенных типах течений.

Средние значения потоков импульса для разных экспериментов согласуются между собой, хотя по наблюдениям на КА *Mariner 2*, *Vela 3*, *Helios 1,2* [233, 215, Steinitz and Einy, 1980; Schwenn, 1983] они несколько ниже, а на спутнике *IMP 8*

Таблица 5.1: Потoki массы, импульса, энергии и отношения теплового и магнитного давления солнечного ветра по измерениям на разных космических аппаратах.

КА	Период наблюд. годы	Поток частиц $nV, 10^8$ част./см <sup>2</sup> с	Поток импульс $mnV^2, 10^{-8}$ дин./см <sup>2</sup> с	Поток кинетич. энергии $0.5mnV^3$ эрг/см <sup>2</sup> с	Поток теплов. энергии $nkTV, 10^{-2}$ эрг/см <sup>2</sup> с	$\beta$ параметр $nkT/(B^2/8\pi)$	Условия	Ссылки
Vela, IMP	1971-1974	3.8±2.4 3.9±1.5 2.7±0.4		0.70±0.5 0.35±0.1 1.10±0.2	1.6±2.0** 0.4±0.2** 2.3±5.0**	0.7±0.9	all data $V < 350$ км/с $V > 650$ км/с	[107] Feldman et al., 1977
Mariner 2 Vela3 Helios 1	1962 1965-1967 1974-1975		1.69±0.08 1.89±0.10 2.22±0.07					[233] Steinitz and Еуні, 1980
Helios 2	1976	2.7	2.18±0.05	0.58*				
Helios 1,2	1975-1976	2.86 3.66 1.99	2.15 2.12 2.26	0.52 0.37 0.76	1.6 ** 1.1 ** 2.3 **		all data $V < 400$ км/с $V > 600$ км/с	[215] Schwenn, 1983
ISEE 3	1978-1980	3.2	2.15±0.05*	0.45*			all data	[168] Mullan, 1983
Dif. S/C	1965-1980	4.3±2.2	2.5±1.3*	0.42±0.23*			streamers	[213] Sastri, 1987
IMP 8	1984-1985	5.75 4.87 3.21	3.35 3.69 3.45				200-400 км/с 400-600 км/с 600-800 км/с	[162] Lopez, 1987
Prognoz 7	1978-1979	3.8±3.1 5.5±2.4 3.3±3.1	2.8±2.4 2.4±1.5 3.3±3.1	0.63±0.67 0.44±0.19 1.00±0.99	0.7±3.0 0.3±0.2 1.2±1.6		all data $V < 350$ км/с $V > 550$ км/с	[257] Zastenker and Borodkova, 1992
Prognoz 7	1978-1979	10.5±3.9 3.4±1.5 2.7±1.5 4.4±3.9 4.5±3.4 3.7±2.0 4.8±2.8 3.0±0.7	6.3±2.9 2.1±1.0 2.1±1.2 4.0±3.4 4.1±3.6 2.6±1.2 2.9±1.7 2.4±0.4	1.13±0.56 0.38±0.20 0.47±0.28 1.12±0.95 1.12±1.15 0.56±0.27 0.53±0.30 0.57±0.24	0.9±0.8 0.3±0.5 0.4±0.5 1.1±1.8 1.3±1.4 0.5±0.3 0.4±0.2 0.6±0.3	2.0±1.7 0.5±0.6 0.6±0.8 0.6±0.7 1.0±0.8 0.8±0.4 1.0±0.7 0.6±0.1	1.HCS 2.CSs 3.CHs 4.CIRs 5.MCs all data 1+2 3+4+5	[30] Ермолаев и Ступин, 1992
Prognoz 7	1978-1979	4.2±3.1 3.1±1.4	3.7±2.9 2.6±1.3	1.00±0.92 0.68±0.38	1.3±1.2 0.3±0.3	1.0±0.8 0.3±0.3	4.CIRs 5.MCs	[247] Yermolaev, 1996
* - величины получены из средних значений $nV^2$ и $nV^3$ , соответственно.								
** - величины получены по формуле $2.5nkTV$ .								

[162, Lopez, 1987] несколько выше, чем на других КА. Во всех экспериментах различия потоков импульса в быстрых и медленных течениях солнечного ветра малы. С учетом длительности наблюдений разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* может быть сделана оценка того, какая часть импульса переносится тем или иным типом солнечного ветра: максимальная часть - в течениях типа СН, в течениях типа НСS и CS - на 30 и 50% меньше, а в течениях типа СIР и МС - меньше в 4 и 6 раз.

Средние потоки кинетической энергии для разных космических экспериментов достаточно хорошо согласуются между собой, при этом в быстрых течениях солнечного ветра наблюдаются более высокие потоки кинетической энергии, чем в медленных. То же самое относится и к потокам тепловой энергии, при этом необходимо отметить, что по данным спутников серий *Vela* и *IMP* [107, Feldman et al., 1977] и КА *Helios 1,2* [215, Schwenn, 1983] поток тепловой энергии определялся по выражению  $2.5nkT_p v_p$ , в то время как по данным спутника *Прогноз 7* в [257, 30, Zastenker and Borodkova, 1992; Ермолаев и Ступин, 1992] - по выражению  $nkT_p v_p$ . В обоих случаях поток тепловой энергии, переносимый электронами, не учитывался. С учетом этого замечания существенных различий между средними результатами различных экспериментов не наблюдается.

Учитывая длительность наблюдений на спутнике *Прогноз 7* разных типов солнечного ветра, можно получить оценку, что энергетические затраты Солнца на тепловую и кинетическую энергию солнечного ветра в течениях из корональных дыр в 2-5 раз больше, чем в гелиосферном токовом слое и возмущенных течениях, и в 1.5-2.0 раза больше, чем в течениях из области корональных стримеров.

Данных о распределении отношения теплового и магнитного давлений (или плотностей энергий)  $\beta$  в солнечном ветре опубликовано сравнительно немного. Известно, что этот параметр в солнечном ветре в среднем близок, но несколько ниже 1 (для электронов  $\beta_e = nkT_e / (B^2 / 8\pi)$  - несколько выше 1 [107, Feldman et al., 1977]). Таким образом, в движущейся плазме солнечного ветра давление магнитного поля в среднем уравнивается тепловым движением ионов. Однако в области гелиосферного токового слоя отношение давлений несколько выше среднего, что, по-видимому, связано с аннигиляцией магнитного поля и нагревом и ускорением плазмы в этой области во время пересоединения магнитного поля [24, 243, Ермолаев, 1990; Yermolaev, 1991]. Возможно также, что более низкие значения параметра  $\beta$  характерны для плазмы, выброшенной из солнечной атмосферы (в течениях типа МС) [195, 247, Osherovich et al., 1993; Yermolaev, 1996].

Сравнение данных спутника *Прогноз 7* с результатами, полученными на разных космических аппаратах, в течениях, связанных с корональными стримерами [213, Sastri, 1987], показывает, что, по-видимому, последние данные помимо плазмы из стримеров (в нашем определении таких течений) содержат также и данные о плазме гелиосферного токового слоя. Поэтому объединенные

средние для течений типа HCS и CS оказываются близкими к результатам, полученным в работе [213, Sastri, 1987].

Средние значения, полученные по данным спутника *Прогноз 7* в работе [257, Zastenker and Borodkova, 1992], несколько выше, чем определенные в последующих работах путем усреднения значений, которые первоначально были усреднены по типам течений. Это связано с известным в статистике эффектом: при определении средних значений параметров, обладающих распределениями с длинными "хвостами" в области высоких значений, предварительное усреднение по малым наборам данных уменьшает влияние этих "хвостов" на статистические характеристики. Это проявляется в уменьшении средней величины (и ее приближение к наиболее вероятной величине) и среднеквадратичного отклонения, при этом эффект усиливается с ростом отклонения от нормального распределения (т.е. чем более длинный "хвост" в распределении имеет рассматриваемый параметр).

Приведенные в Табл. 5.1 средние данные охватывают интервал времени, превышающий 11-летний цикл солнечной активности. Однако они не показывают крупномасштабных вариаций параметров, связанных с этим циклом. Возможно, такие вариации маскируются как большим естественным разбросом наблюдаемых параметров, так и возможными ошибками экспериментов. На возможность этих источников неопределенности параметров указывают очень широкие гистограммы параметров. Кроме того, обращает на себя внимание разница между результатами различных экспериментов, проведенных приблизительно в одно и то же время. Анализ данных Табл. 5.1 показывает необходимость проведения интеркалибровки различных инструментов перед изучением возможных крупномасштабных вариаций исследуемых параметров в солнечном цикле.

Проведенная селекция данных спутника *Прогноз 7* позволяет сопоставить периоды наблюдения различных типов солнечного ветра с периодами возникновения геомагнитных возмущений типа SSC-событий. На Рис. 5.6 показано распределение таких событий по типам солнечного ветра. Во время наблюдения гелиосферного токового слоя таких событий обнаружено не было. Несмотря на то, что число SSC-событий для разных типов течений отличается сравнительно мало (от 2 в течениях из CS до 14 в CIR), различия в частоте их появления более существенные: в квазистационарных течениях наблюдается около 0.1 события в сутки, а в возмущенных течениях - около 3-5 событий в сутки. Анализ изменения параметров, характерных для различных типов солнечного ветра, показывает, что наиболее вероятной причиной возникновения SSC-событий является скачок давления в солнечном ветре, что хорошо согласуется с результатами работы [221, Sibeck et al., 1989].

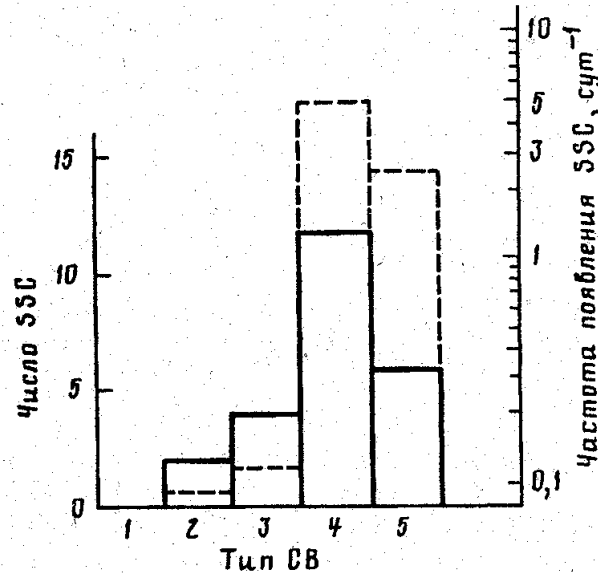


Рис. 5.6: Гистограммы распределения по разным типам солнечного ветра числа внезапных начал магнитосферных возмущений (SSC) - сплошная линия (шкала справа) и частоты появления SSC - штриховая линия (шкала справа) по данным спутника *Прогноз 7* [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]

## 5.2 Поведение содержания и динамика $\alpha$ -частиц в разных типах течений солнечного ветра

Как уже обсуждалось выше, относительное содержание гелия в солнечном ветре практически не изменяется по пути от области его формирования в солнечной короне до космического аппарата. Представленные на Рис. 5.7 гистограммы показывают, что несмотря на большой разброс параметров, все типы течений имеют пики, смещенные друг относительно друга, и сдвиги наиболее заметны на нижней панели рисунка. С одной стороны, это означает, что рассматриваемые течения действительно формируются при разных условиях (или в разных структурах) солнечной короны, а с другой стороны, указывает, что вклад  $\alpha$ -частиц в динамику солнечного ветра меняется в несколько раз при переходе от одного типа течения солнечного ветра к другому. Например, доля кинетической энергии солнечного ветра, переносимой  $\alpha$ -частицами, меняется от нескольких % в HCS до более 40% в магнитных облаках. И этот вклад  $\alpha$ -частиц в динамику солнечного ветра необходимо учитывать [87, Burgi and Geiss, 1986].

Перейдем к описанию корреляции содержания гелия и его переносной скорости и кинетической температуры с МГД параметрами солнечного ветра. И начнем с представления зависимости содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$ . Эта зависимость представлена на Рис. 5.8 отдельно для течений с низкой скоростью ( $v_p < 450$  км/с) - течения в HCS (открытые



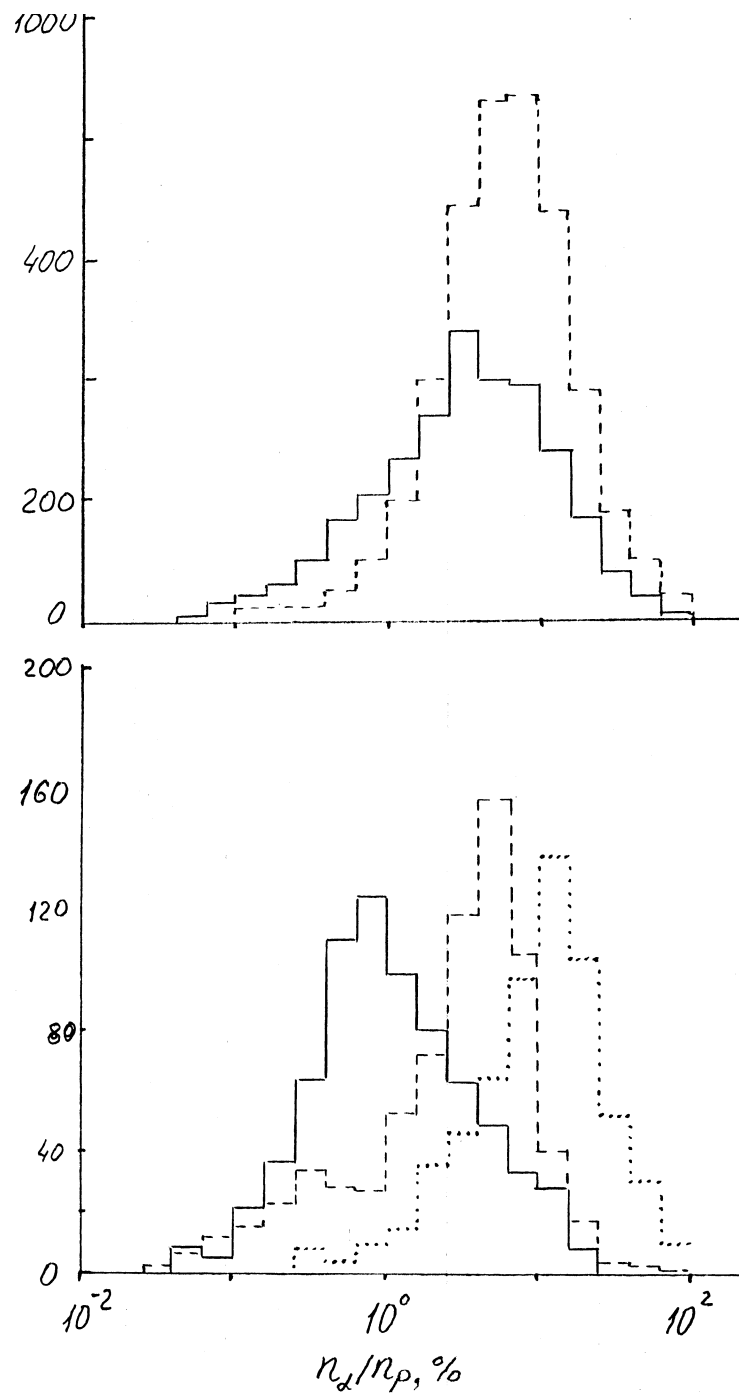


Рис. 5.7: Гистограммы относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  для разных типов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [247, Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1.

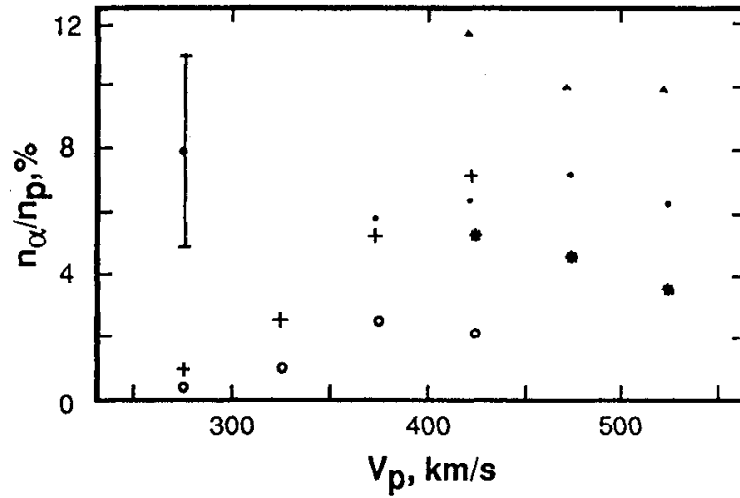


Рис. 5.8: Зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7*: в гелиосферном токовом слое (светлые кружки), в течениях из корональных стримеров (крестики) и корональных дыр (темные кружки), в CIR (звездочки) и в магнитных облаках (треугольники) [250, Yermolaev and Stupin, 1997].

кружки) и течения из CS (крестики) - и с высокой скоростью ( $v_p > 350$  км/с) - течения из CH (темные кружки), течения CIR (звездочки) и плазма магнитных облаков (треугольники). Среднее значение ошибки (бар) также показано на рисунке. Чтобы обеспечить достаточную статистику в каждом скоростном интервале, данные были усреднены по  $v_p$  в интервалах 50 км/с. Таблица 5.2 представляет коэффициенты линейных аппроксимаций для всех типов течений солнечного ветра на Рис. 5.8 - 5.15. [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения на Рис. 5.9 - 5.15 такие же, как и на Рис. 5.8.

В низкоскоростном диапазоне с  $275 < v_p < 425$  км/с содержание гелия  $n_\alpha/n_p$  увеличивается от 0.4 до 2.1 % в HCS и от 1.0 до 7.3 % в течениях из CS. В высокоскоростном диапазоне с  $375 < v_p < 525$  км/с поведение  $n_\alpha/n_p$  в различных типах течений отличается: в течениях из CH величина  $n_\alpha/n_p$  слегка увеличивается в диапазоне от  $\sim 6$  до  $\sim 7$  %, в CIR величина  $n_\alpha/n_p$  уменьшается от 5.3 до 3.7 % и в MC эта величина уменьшается от 11.8 до 10.0%.

Зависимости изобилия гелия  $n_\alpha/n_p$  от плотности  $n$  и потока ионов  $nv_p$  в различных типах течений, полученных на основе данных спутника *Прогноз 7*, представлены на Рис. 5.9 и 5.10. Зависимости от  $n$  и  $nv_p$  в соответствующих типах течений подобны друг другу. В течениях из CS и HCS содержание  $n_\alpha/n_p$  уменьшается вдоль общей кривой от 5 до  $\sim 1.5\%$  с увеличением  $n$  и  $nv_p$ . Содержание гелия слегка увеличивается соответственно от  $\sim 2$  до  $\sim 4\%$  в CIR и от  $\sim 5$  до  $\sim 6.5$  % в течениях из CH. В MC содержание  $n_\alpha/n_p$  уменьшается от  $\sim 11$  до  $\sim 6$  %.

Таблица 5.2: Аппроксимация параметров в пяти типах течений солнечного ветра для Рис. 5.8-5.15  
 Типы течений солнечного ветра

Рис.	Аппроксимация	HCS	CS	CH	CIR	MC
5.8	$n_\alpha/n_p = AV_p \times 10^{-2} + B \times 10$	$A = 2.30 \pm 0.30$ $B = -0.57 \pm 0.11$	$8.00 \pm 0.45$ $-2.24 \pm 0.16$	$0.54 \pm 0.28$ $0.67 \pm 0.13$	$-2.94 \pm 0.32$ $2.00 \pm 0.16$	$-3.99 \pm 0.84$ $3.40 \pm 0.42$
5.9	$n_\alpha/n_p = AnV_p \times 10^{-9} + B \times 10$	$A = -0.03 \pm 0.34$ $B = 0.23 \pm 0.04$	$-9.28 \pm 1.03$ $0.95 \pm 0.04$	$2.72 \pm 0.95$ $0.83 \pm 0.03$	$2.26 \pm 0.71$ $0.41 \pm 0.04$	$-10.0 \pm 3.59$ $1.73 \pm 0.13$
5.10	$n_\alpha/n_p = An \times 10^{-1} + B \times 10$	$A = -0.28 \pm 0.14$ $B = 0.32 \pm 0.04$	$-4.70 \pm 0.36$ $1.09 \pm 0.04$	$1.11 \pm 0.41$ $0.84 \pm 0.03$	$1.72 \pm 0.36$ $0.36 \pm 0.04$	$-2.47 \pm 1.80$ $1.57 \pm 0.13$
5.11a	$ V_\alpha  -  V_p  = AV_p \times 10^{-1} + B \times 10$	$A = 1.34 \pm 0.15$ $B = -4.56 \pm 0.55$	$0.08 \pm 0.11$ $0.15 \pm 0.39$	$0.09 \pm 0.12$ $0.16 \pm 0.29$	$-0.46 \pm 0.13$ $2.70 \pm 0.65$	$-0.51 \pm 0.14$ $2.68 \pm 0.71$
5.11b	$T_\alpha/T_p = AV_p \times 10^{-2} + B$	$A = 2.00 \pm 0.30$ $B = -3.73 \pm 1.08$	$3.57 \pm 0.29$ $-7.40 \pm 1.06$	$-0.10 \pm 0.13$ $5.94 \pm 0.59$	$-0.22 \pm 0.19$ $5.15 \pm 1.00$	$1.54 \pm 0.33$ $-2.43 \pm 1.66$
5.12a	$ V_\alpha  -  V_p  = AV_A \times 10^{-1} + B \times 10$	$A = 5.86 \pm 0.97$ $B = -1.12 \pm 0.29$	$3.28 \pm 0.30$ $-1.40 \pm 0.18$	$0.14 \pm 0.22$ $0.15 \pm 0.16$	$0.57 \pm 0.41$ $0.02 \pm 0.28$	$-1.78 \pm 0.30$ $1.61 \pm 0.30$
5.12b	$T_\alpha/T_p = AV_A \times 10^{-1} + B$	$A = 1.42 \pm 0.19$ $B = -0.11 \pm 0.55$	$1.22 \pm 0.09$ $0.00 \pm 0.53$	$0.03 \pm 0.04$ $5.20 \pm 0.32$	$-0.01 \pm 0.06$ $3.98 \pm 0.44$	$0.00 \pm 0.07$ $5.29 \pm 0.72$
5.13	$T_\alpha/T_p = AX + B$	$A = 3.49 \pm 0.27$ $B = 3.52 \pm 0.17$	$4.13 \pm 0.18$ $5.91 \pm 0.13$	$1.74 \pm 0.16$ $5.29 \pm 0.09$	$-0.25 \pm 0.49$ $4.06 \pm 0.18$	$1.70 \pm 0.43$ $5.19 \pm 0.27$
5.14a	$ V_\alpha  -  V_p  = A\tau_e/\tau_s \times 10 + B$	$A = -0.56 \pm 0.05$ $B = 7.49 \pm 1.08$	$-0.56 \pm 0.06$ $0.34 \pm 0.53$	$-1.20 \pm 0.17$ $9.52 \pm 0.49$	$-5.72 \pm 2.35$ $5.27 \pm 1.28$	$-0.25 \pm 0.25$ $1.84 \pm 1.26$
5.14b	$( V_\alpha  -  V_p )/V_A = A\tau_e/\tau_s + B \times 10$	$A = -0.24 \pm 0.03$ $B = 2.50 \pm 0.52$	$-0.46 \pm 0.04$ $1.08 \pm 0.18$	$-0.17 \pm 0.05$ $1.35 \pm 0.13$	$-1.63 \pm 0.38$ $0.95 \pm 0.23$	$-0.46 \pm 0.12$ $0.70 \pm 0.24$
5.15	$T_\alpha/T_p = A\tau_e/\tau_c \times 10 + B$	$A = -0.07 \pm 0.01$ $B = 5.14 \pm 0.20$	$-0.15 \pm 0.01$ $6.41 \pm 0.14$	$-0.22 \pm 0.02$ $5.73 \pm 0.09$	$-1.07 \pm 0.18$ $4.46 \pm 0.18$	$-0.14 \pm 0.04$ $5.46 \pm 0.28$
$[n_\alpha/n_p] = \%$ ; $[V_p] = [V_\alpha] = [V_A] = \text{км/с}$ ; $[n] = \text{см}^{-3}$ ; $[nV_p] = \text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .						

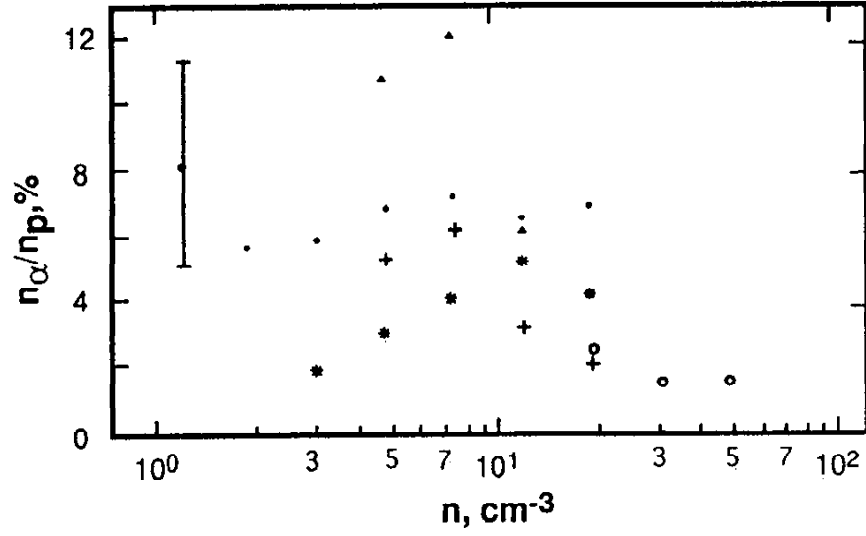


Рис. 5.9: Зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от плотности солнечного ветра  $n$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

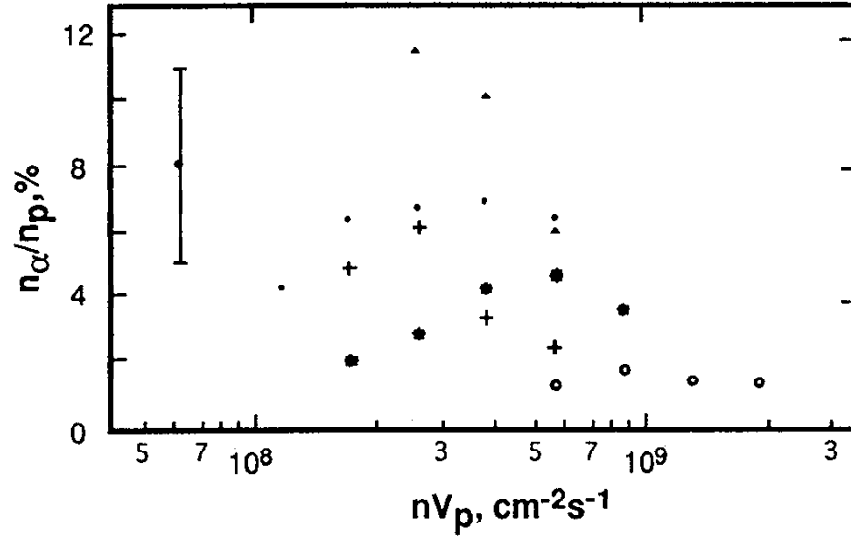


Рис. 5.10: Зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nV_p$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

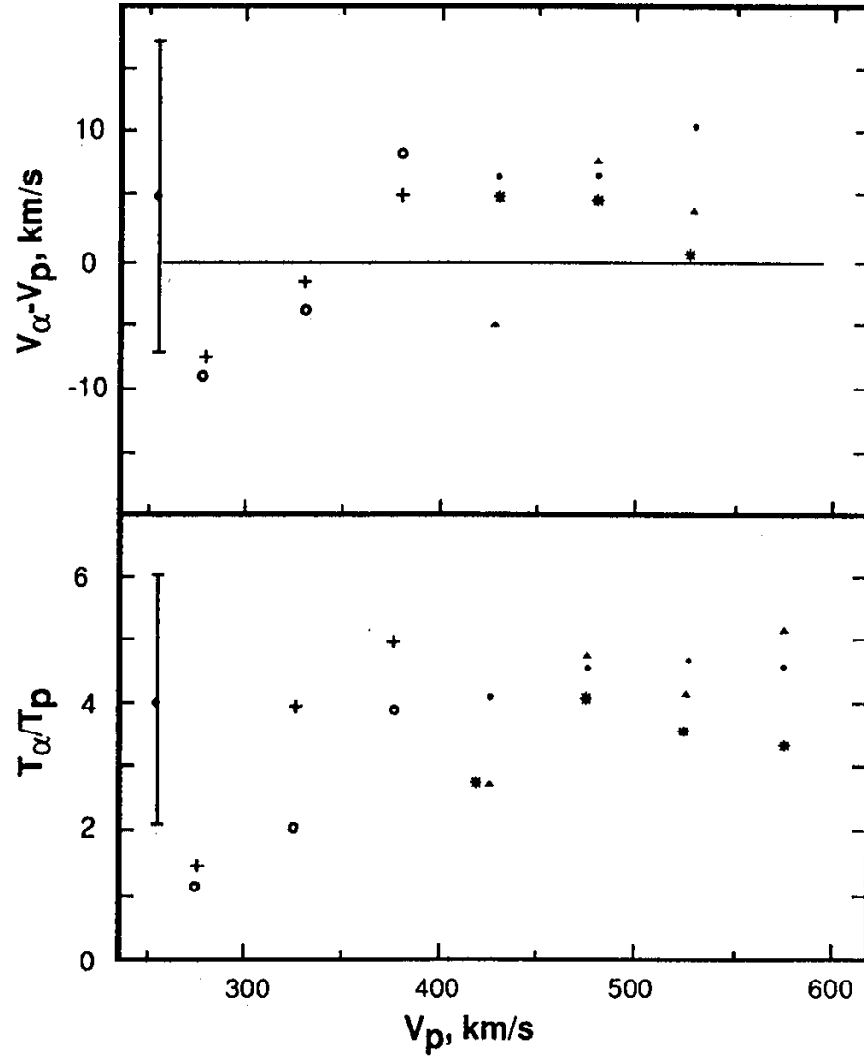


Рис. 5.11: Зависимость разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов от скорости солнечного ветра  $v_p$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

Корреляции разности скоростей и отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов с параметрами солнечного ветра дают возможность изучать процессы ускорения и нагрева  $\alpha$ -частиц относительно главной (протонной) ионной компоненты солнечного ветра. Зависимости разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $\Delta v$  и их температурного отношения  $T_\alpha/T_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  в различных типах течений представлены, соответственно, на верхней и нижней панелях Рис. 5.11.

Как видно на верхней панели Рис. 5.11, когда протонная скорость  $v_p$  увеличивается от 275 до 375 км/с, разность скоростей  $\Delta v$  увеличивается в HCS и течениях из CS, соответственно, от -9 до 7 км/с и от -8 до 5 км/с. Разность скоростей  $\Delta v$  увеличивается мало от 7 до 10 км/с, когда скорость протонов увеличивается от 425 до 525 км/с в течениях из SH.  $\Delta v$  уменьшается от  $\sim 5$  км/с до  $\sim 0$  в течениях CIR, и  $\Delta v$  не является монотонной функцией скорости

в МС.

Зависимости отношения температур от скорости ветра в различных типах течений (см. нижнюю панель Рис. 5.11) подобны аналогичным зависимостям разности скоростей. Однако, в отличие от верхней панели Рис. 5.11, где кривые разности скоростей для течений из CS и из СН имеют приблизительно одинаковые наклоны и расположены около общей кривой, кривые температурного отношения в этих типах течений отличаются:  $T_\alpha/T_p$  увеличиваются от 1.5 до 5.0 при увеличении скорости от 275 до 375 км/с в течениях из CS, но приблизительно постоянны в диапазоне  $425 < v_p < 575$  км/с в течениях из СН. Температурное отношение изменяется немного от 3 до 4 в течениях CIR и увеличивается от  $\sim 3$  до  $\sim 5$  в МС при увеличении скорости от 425 до 575 км/с.

Как было показано во введении и разделе 3.6., часто предполагается, что ускорение и нагрев  $\alpha$ -частиц в солнечном ветре вызываются взаимодействием альвеновских волн с плазмой. Целый ряд экспериментов показал корреляцию разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $\Delta v$  с величиной альвеновской скорости [174, Neugebauer, 1981], однако зависимость  $T_\alpha/T_p$  от  $v_A$  была получена только по данным спутника *Прогноз 7* [25, Ермолаев, 1994a]. Зависимости разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $\Delta v$  и температурного отношения  $T_\alpha/T_p$  от альвеновской скорости  $v_A$  в различных типах течений представлены на верхней и нижней панелях Рис. 5.12, соответственно.

Разность скоростей  $\Delta v$  увеличивается от -8 до 16 км/с в HCS при увеличении  $v_A$  от 10 до 40 км/с. В диапазоне от 30 до 60 км/с величина  $\Delta v$  увеличивается от  $\sim -10$  до  $\sim 10$  км/с в течениях из CS и из СН, соответственно; она продолжает расти до  $\sim 14$  км/с при  $v_A = 80$  км/с в течениях из CS, но уменьшается до  $\sim 8$  км/с при  $v_A = 100$  км/с в течениях из СН. В CIR кривая  $\Delta v$  изменяется подобно кривым для течений из CS и из СН в диапазоне  $v_A = 40-80$  км/с. Соотношения между  $\Delta v$  и  $v_A$  в МС более сложные:  $\Delta v$  составляет 6-8 км/с, когда  $50 < v_A < 70$  км/с и  $\Delta v$  – от -4 до -6 км/с, когда  $80 < v_A < 110$  км/с (в этом диапазоне данные были усреднены в более широких интервалах).

Температурное отношение  $T_\alpha/T_p$  в HCS и течениях из CS увеличивается по общей прямой линии от  $\sim 1$  до  $\sim 8$  при увеличении  $v_A$  от 10 до 80 км/с. В течениях из СН  $T_\alpha/T_p$  вырастает слегка от  $\sim 4$  до  $\sim 6$  при увеличении  $v_A$  от 30 до 100 км/с. Температурное отношение изменяется немного от 2.5 до 3.5 и от 4 до 5 для  $50 < v_A < 100$  км/с в течениях CIR и МС, соответственно.

Измерения на спутнике *Прогноз 7* позволяют нам изучать соотношения между преимущественным нагревом и ускорением  $\alpha$ -частиц в различных типах течений солнечного ветра. Зависимости отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от их разности скоростей относительно их средней тепловой скорости  $X = \Delta v / [2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$ , в различных типах течений представлены на Рис. 5.13.

В HCS отношение  $T_\alpha/T_p$  монотонно увеличивается от 1.5 до 8 при увеличении  $X$  от -0.6 до 0.8. В течениях из CS зависимость подобна, но температурное

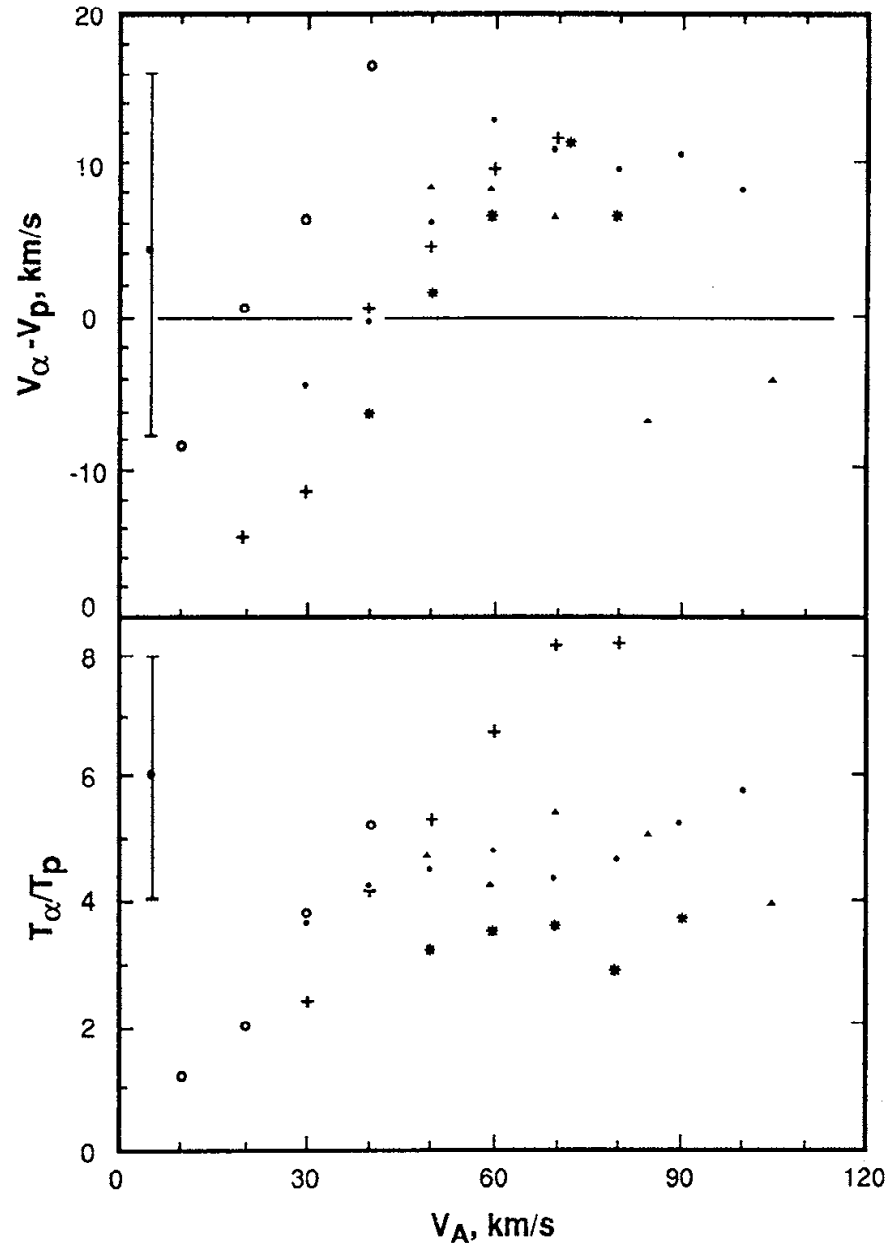


Рис. 5.12: Зависимость разности скоростей  $v_\alpha - v_p$  и отношения температур  $T_\alpha/T_p$   $\alpha$ -частиц и протонов от альвеновской скорости солнечного ветра  $v_A$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

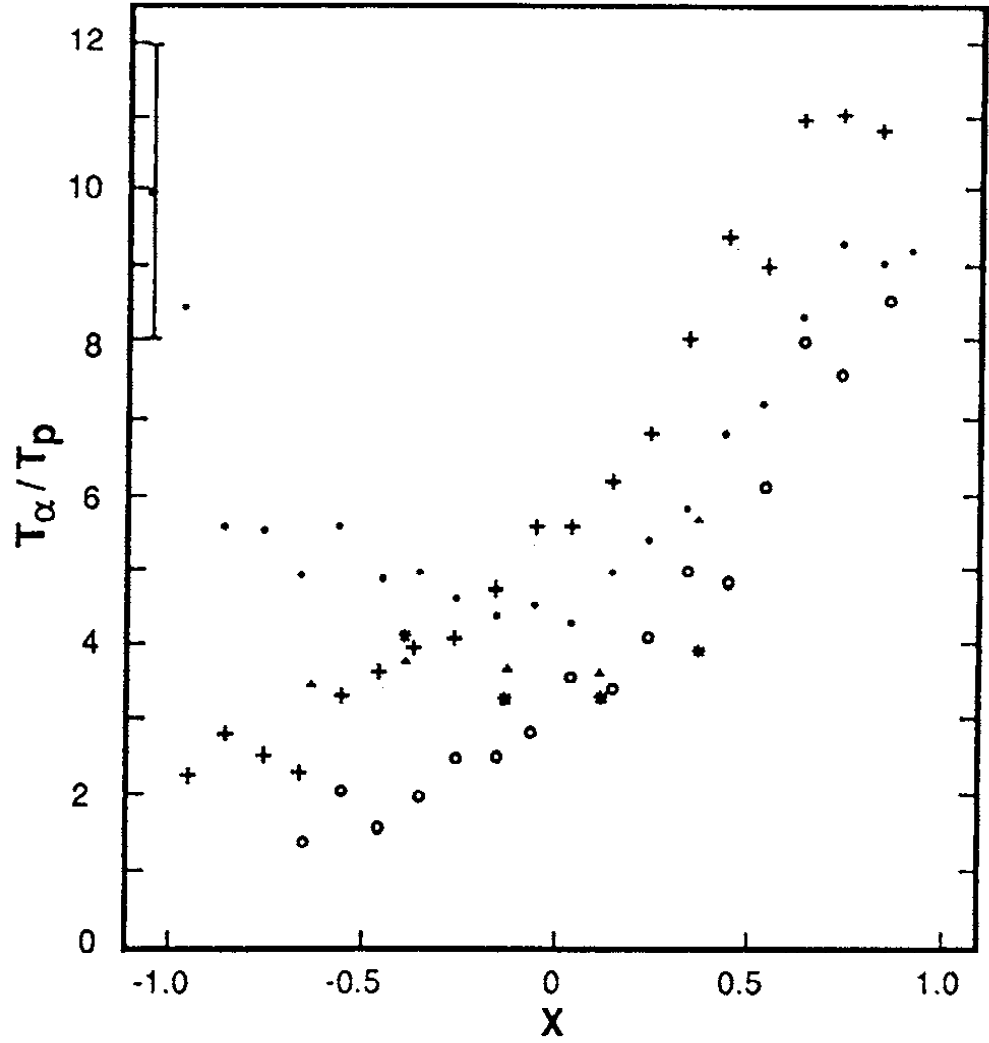


Рис. 5.13: Зависимость отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от их разности скоростей относительно их средней тепловой скорости  $X = \Delta v / [2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.



отношение выше, чем оно в HCS, и увеличивается от 2 до 11 при увеличении  $X$  от -1.0 до 0.9. Зависимость для течений из СН - немонотонная, и температурное отношение уменьшается от 8 до 4 при увеличении  $X$  от -1.0 до 0 и увеличивается от 4 до 9 при увеличении  $X$  от 0 до 1.0. В CIR  $T_\alpha/T_p$  изменяется мало: от 3 до 4 в диапазоне  $X$  от -0.4 до 0.4. Температурное отношение в MC увеличивается от 3 до 5.5 при увеличении  $X$  от -0.6 до 0.4.

Как было показано во введении и разделе 3.7, часто предполагается, что кулоновские столкновения могут уравнивать скорости и температуры  $\alpha$ -частиц и протонов. Поэтому интересно сравнить разности скоростей  $\Delta v$  и  $\Delta v/v_A$  с отношением времени расширения солнечного ветра к времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  (см. Рис. 5.14) и сравнить температурное отношение  $T_\alpha/T_p$  с отношением времени расширения солнечного ветра к времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  (см. Рис. 5.15) в различных типах течений солнечного ветра. Параметры  $\tau_e/\tau_s$  и  $\tau_e/\tau_c$  были получены на основе измерений на спутнике *Прогноз 7* с использованием формул 2.24 - 2.26, представленных во второй главе.

На верхней и нижней панелях Рис. 5.14 зависимости разности скоростей  $\Delta v$  и  $\Delta v/v_A$  от  $\tau_e/\tau_s$  представлены для HCS, течений из CS и СН, для CIR и MC. Эти рисунки показывают, что в бесстолкновительной плазме ( $\tau_e/\tau_s < 0.3$ ), различие между кривыми для течений из СН и CS мало, но в столкновительной плазме ( $\tau_e/\tau_s > 0.3$ ) оно достигает  $\sim 10$  км/с и 0.3, соответственно, и для обоих типов течений, разности скоростей отрицательны. Неожиданным результатом является тот факт, что разности скоростей в HCS выше, чем в течениях из СН и CS. Следует отметить, что число наблюдений в бесстолкновительной плазме в HCS не велико ( $\sim 27$  % от общего количества наблюдений в HCS, или приблизительно 27 часов наблюдений). Поведение  $\Delta v$  в CIR и MC подобно найденному в течениях из CS и СН.

В отличие от разности скоростей, температурные отношения  $\alpha$ -частиц и протонов (см. Рис. 5.15) в течениях из СН и CS отличаются, и кривая для течений из CS выше, чем кривая для течений из СН, и близка к кривой для HCS. Кривая для CIR близка к кривой для течений из СН, а кривая для MC оказывается самой низкой из всех. Все кривые достигают  $\sim 1$  в столкновительной плазме ( $\tau_e/\tau_c > 0.3$ ).

Как было показано в главе 3, большинство зависимостей, представленных выше, было ранее получено без селекции данных по типам течений солнечного ветра на основе измерений на различных космических аппаратах. Здесь же мы представляем данные в едином формате после сортировки данных спутника *Прогноз 7* по различным типам течений солнечного ветра. Этот подход позволяет найти физические отличия одного типа течения от другого. Тенденции поведения зависимостей параметров  $\alpha$ -частиц и протонов от параметров солнечного ветра кратко суммированы в Табл. 5.3, а результаты аппроксимации - в Табл. 5.2.

Вообще, данные относительно зависимости  $n_\alpha/n_p$  от  $V_p$ , представленные на

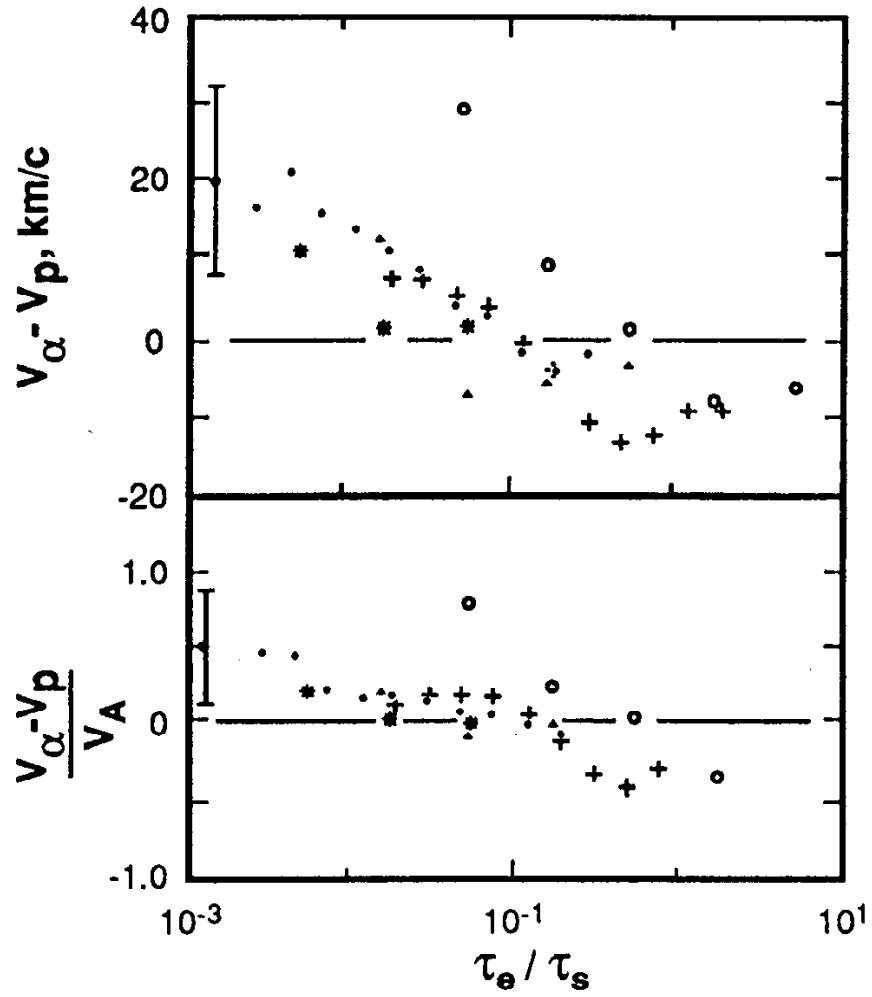


Рис. 5.14: Зависимость разности скоростей  $\Delta v$  и  $\Delta v/v_A$  от отношения времени расширения солнечного ветра к времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

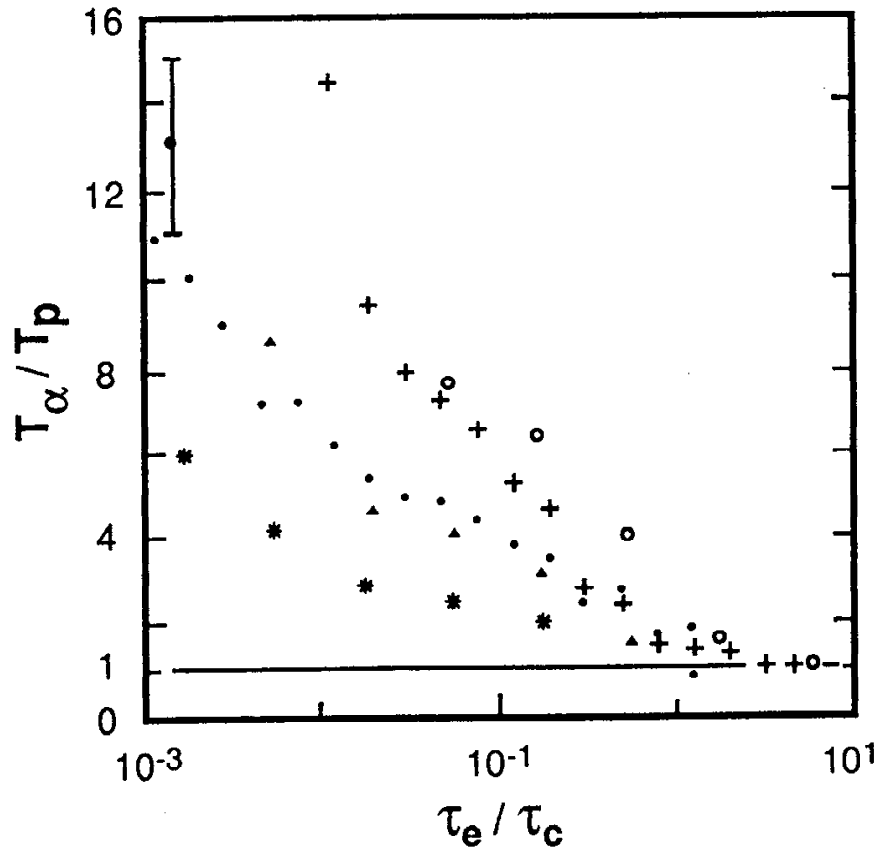


Рис. 5.15: Зависимость отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_c$  в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8.

Таблица 5.3: Схематическое представление зависимостей, показанных на Рис. 5.8-5.15

Зависимости	Типы солнечного ветра				
	HCS	CS	CH	CIR	MC
$n_\alpha/n_p = f(v_p)$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\searrow$
$n_\alpha/n_p = f(nv_p)$	$\searrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$
$n_\alpha/n_p = f(n)$	$\searrow$	$\searrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$
$v_\alpha - v_p = f(v_p)$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$	$\nearrow?$
$v_\alpha - v_p = f(v_A)$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\searrow$
$T_\alpha/T_p = f(v_p)$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\longrightarrow$	$\searrow?$	$\nearrow$
$T_\alpha/T_p = f(v_A)$	$\nearrow$	$\nearrow$	$\longrightarrow?$	$\longrightarrow?$	$\longrightarrow?$
$T_\alpha/T_p = f(X)$	$\nearrow$	$\nearrow$	U	$\longrightarrow?$	$\nearrow$
$v_\alpha - v_p = f(\tau_e/\tau_s)$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$
$\frac{v_\alpha - v_p}{v_A} = f(\tau_e/\tau_s)$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$
$T_\alpha/T_p = f(\tau_e/\tau_c)$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$	$\searrow$

Рис. 5.8, согласуются с результатами, полученными без селекции на спутниках *Vela 3* [136, 137, Hirshberg et al., 1972a, b], *Explorer 34, 43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *IMP 6-8* [74, Bame et al, 1977], *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981a], *ISEE 3* [194, Ogilvie et al, 1989], и *Прогноз 7* [29, 34, Ермолаев и Ступин, 1990а; Ермолаев, 1990]. Только в статье [177, Neugebauer, 1992] были отселектированы данные *ISEE 3* и *IMP 6-8* по пяти различным типам течений: три квазистационарных типа (плазменный слой (PS), межструйные течение (interstream - INS), корональные дыры (CH)), и два переходных типа (двунаправленные потоки электронов (BES) и повышения изобилия гелия (HAE)). Первые три типа течения, вероятно, подобны нашим первым трем типам и могут быть сравнены друг с другом. По нашему мнению, типы плазмы BES и HAE могут быть сравнены с MC, но в упомянутой выше статье нет никакой аналогии для CIR и плазмы после ударных волн.

Оба исследования показывают, что изобилие гелия коррелирует со скоростью солнечного ветра во всех трех квазистационарных типах течений и антикоррелирует в MC и HAE. Кроме того, данные спутника *Прогноз 7* показывают, что плазма CIR имеет то же самое изобилие гелия как в начальном (до прихода области взаимодействия разноскоростных течений и межпланетной

ударной волны) квазистационарном течении, и она ускорена до более высокой скорости. Антикореляция  $n_\alpha/n_p$  и  $v_p$  в CIR (в том числе в плазме за фронтом ударной волны) согласуется с предположением [99, Eselevich and Fillipov, 1988], что условия около HCS являются благоприятными для распространения межпланетных ударных волн.

В целом зависимости  $n_\alpha/n_p$  от  $nv_p$ , представленные на Рис. 5.10, находятся в хорошем согласии с данными, полученными без селекции на спутниках *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972a], *Explorer 34, 43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981a] и *Прогноз 7* [29, 34, Ермолаев и Ступин, 1990a; Ермолаев, 1990]. На основе данных *Прогноз 7* показано, что избыток гелия коррелирует с потоком ионов в течениях из СН и антикоррелирует в течениях из CS [245, Yermolaev, 1992b]. Рис. 5.10 также показывает, что в HCS избыток гелия почти не зависит от потока ионов, но оно коррелирует с потоком в CIR и антикоррелирует в MC.

Антикорреляция избытка гелия  $n_\alpha/n_p$  и плотности ионов  $n$  была получена по данным спутников *Explorer 34, 43* [190, Ogilvie and Wilkerson, 1969]. Позже на основе данных *Heos 1* зависимость  $n_\alpha/n_p$  от  $n$  не была обнаружена [114, Formisano et al., 1970]. Данные спутников *Vela* и *IMP* показывали, что в медленных и плотных течениях (из стримеров) солнечного ветра, избыток гелия антикоррелирует с плотностью [127, 109, Gosling et al., 1981; Feldman et al., 1981]. На основе данных спутника *Прогноз 7* показано, что избыток гелия коррелирует с плотностью ионов в течениях из СН и антикоррелирует в течениях из CS [245, Yermolaev, 1992b]. Рис. 5.9 также показывает, что избыток гелия коррелирует с плотностью в CIR и антикоррелирует в HCS и MC. Таким образом, можно прийти к выводу, что при усреднении за большой период времени зависимость относительного содержания гелия от плотности и величины потока может оказаться любой и определяется соотношением времен наблюдения разных типов солнечного ветра, попавших в интервал усреднения.

Таким образом Рис. 5.8 - 5.9 показывают, что механизмы формирования содержания гелия солнечного ветра для различных типов течений отличаются. В частности, полученные результаты поддерживают частично гипотезу [121, Geiss et al., 1970], демонстрируя, что только в течениях из СН малые ионы могут быть вытянуты из солнечной короны в межпланетную среду за счет кулоновского трения с протонной компонентой [29, 243, Yermolaev and Stupin, 1990a; Yermolaev, 1991]. С другой стороны, качественная модель, основанная на наблюдениях на *IMP* и *Vela* в течение 1971-1978 годов [85, 109, 127, Borrini et al., 1981; Feldman et al., 1981; Gosling et al., 1981] вероятно, будет работать в HCS и течениях из CS. Избыток гелия в плазме CIR может быть такое же, как в HCS, в течениях из CS и СН, и оно может зависеть от условий распространения области сжатия и межпланетной ударной волны. Содержание гелия в MC связано с процессами ускорения плазмы в солнечной атмосфере, и это требует дальнейших исследований.

Данные о зависимости  $\Delta v$  от  $v_p$ , представленные на верхней панели Рис. 5.11,

находятся в хорошем согласии с данными, полученными без селекции на спутниках *Vela 3* [138, Hirshberg et al., 1974], *Explorer 34, 43* [65, 108, Asbridge et al., 1976; Feldman et al., 1978], *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *OGO 5* и *Explorer 43* [174, Neugebauer, 1981a], *Helios* [165, Marsch et al., 1982] и *ISEE 3* [193, Ogilvie et al., 1982] по полному диапазону скорости солнечного ветра, если для анализа в диапазоне  $v_p > 400$  км/с мы используем результаты, полученные для течений из СН, и игнорируем МС и CIR [25, Ермолаев, 1994].

В целом данные о зависимости  $T_\alpha/T_p$  от  $v_p$ , представленные на нижней панели Рис. 5.11, находятся в хорошем согласии с наблюдениями, полученными без селекции на спутниках *Vela 3* [111, Feynman, 1975], *Прогноз 1* [86, Bosqued et al., 1977], *OGO 5* и *Explorer 43* [174, Neugebauer, 1981a], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* [29, 25, Yermolaev and Stupin, 1990a; Ермолаев, 1994] по полному диапазону скорости. (Данные для спутника *ISEE 3* были получены из зависимости  $T_\alpha/T_p$  от  $t = R/v_p$ , представленной в [152, Klein et al., 1985], где время расширения плазмы  $t$  определялось как отношение расстояния  $R = 1$  а.е. и локальной скорости солнечного ветра).

На основе измерений на спутнике *Прогноз 7* было отмечено, что максимальные разности скоростей и отношений температур наблюдаются в течениях из СН [252, 243, Yermolaev et al., 1991; Yermolaev, 1991]. С другой стороны, данные, представленные на верхней и нижней панелях Рис. 5.11, показывают, что  $\Delta v$  мало или отрицательно в течениях солнечного ветра CIR и МС;  $T_\alpha/T_p$  - обычно меньше, чем 4 в CIR, и изменяется в диапазоне 4 - 6 в МС. Следует отметить, что наиболее отрицательная величина разности скоростей и наименьшее отношение температур наблюдаются в течение первых 10-30 минут за фронтом ударной волны. Факт, что отрицательные разности скоростей и низкие температурные отношения наблюдались за фронтом межпланетных ударных волн, был первоначально обнаружен на основе первого селективного измерения  $\alpha$ -частиц и протонов на спутнике *Прогноз 1* [40, 41, Зерцалов, 1976a,b]. Что касается разности скоростей, то факт наблюдения отрицательной разности скоростей за фронтом ударной волны подтвердился в более поздних селективных экспериментах на спутниках *ISEE 3* [193, Ogilvie et al., 1982] и *Прогноз 7* и *8* [256, 68, Zastenker and Borodkova, 1984; Avakov et al., 1987]. Что касается отношения температур, то оно, по-видимому, сначала за фронтом ударной волны возрастает, а затем в горячей плазме CIR быстро уменьшается [256, 68, 252, Zastenker and Borodkova, 1984a; Avakov et al., 1987; Yermolaev et al., 1991], а результат на спутнике *Прогноз 1* [40, 41, Зерцалов, 1976a,b] связан с медленным (44 мин) измерением спектров ионных компонент.

Выполненный анализ показывает, что данные спутника *Прогноз 7* не противоречат результатам более ранних работ и подтверждают вывод, что на 1 а.е. существует сильное различие между скоростями  $\alpha$ -частиц и протонов в быстрых течениях из СН, но оно отсутствует в МС и может быть маленькое или отрицательное в течениях CIR, в HCS и в течениях из CS; температурное отношение низко в HCS и течениях из CS, и оно высоко в течениях из СН, МС

и CIR (см. Табл. 4.3).

Кроме того, данные Рис. 5.11 позволяют нам сделать некоторые новые заключения. Верхняя панель Рис. 5.11а показывает, что  $\Delta v$  коррелирует с  $v_p$  в HCS и течениях из CS и СН и что эти три кривые близки к общей прямой линии. Разность скоростей, вероятно, антикоррелирует с  $v_p$  в CIR и не показывает никакой однозначную зависимость от  $v_p$  в MC. В отличие от разности скоростей, наклон отношения температур в течениях из HCS отличается от наклона в течениях из HC и течениях из CS: величина  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с  $v_p$  в HCS и течениях из CS и не зависит от  $v_p$  в течениях из СН. Температурное отношение, вероятно, коррелирует с  $v_p$  в MC и не зависит от  $v_p$  в CIR.

Данные относительно зависимости  $\Delta v$  от  $v_A$ , представленной на верхней панели Рис. 5.12, в целом согласуются с наблюдениями, полученными без селекции на спутниках *Vela 6, 7*, *OGO 5*, *Explorer 43* [175, Neugebauer, 1981b] и *Прогноз 7* [25, Ермолаев, 1994]. В соответствии с данными спутника *Прогноз 7*, величина  $\Delta v$  коррелирует с альвеновской скоростью в диапазоне  $10 < v_A < 60$  км/с в HCS и течениях из CS и СН; кривые для CS и СН - очень близки к друг другу, а кривая для HCS ограничена низкими значениями  $v_A$ . Разность скоростей для течений из СН и CIR почти постоянна в диапазоне  $v_A > 60$  км/с и антикоррелирует с  $v_A$  в MC.

Зависимость отношения температур  $T_\alpha/T_p$  от альвеновской скорости  $v_A$  была изучена только по данным спутника *Прогноз 7* [25, Ермолаев, 1994]. В отличие от разности скоростей, кривые для HCS и течений из CS на нижней панели Рис. 5.12 близки друг другу, и величина  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с  $v_A$ ; отношение температур слабо коррелирует в течениях из СН и, вероятно, не зависит от  $v_A$  в CIR и в MC.

Рис. 5.13 показывает, что  $T_\alpha/T_p$  коррелирует с относительной разностью скоростей  $X = \Delta v/[2K(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$  в HCS, в течениях из CS и MC. В CIR величина  $T_\alpha/T_p$ , по-видимому, не зависит от  $X$ . Поведение температурного отношения в течениях из СН наиболее интересно: оно антикоррелирует с отрицательным  $X$  и коррелирует с положительным  $X$ . Так что на основе данных Рис. 5.13 мы можем предположить, что в течениях из СН преимущественный нагрев  $\alpha$ -частиц не зависит от знака разности скоростей и что нагрев увеличивается с увеличением абсолютной величины разности скоростей. Таким образом, можно заключить, что механизмы нагрева  $\alpha$ -частиц в течениях из СН должны отличаться от механизмов в других типах течений солнечного ветра, включая течения из CS [29, 243, 25, 246, Yermolaev and Stupin, 1990; Yermolaev, 1991; Ермолаев, 1994a,b].

Данные о зависимостях  $\Delta v$  от  $\tau_e/\tau_s$  и  $\Delta v/v_A$  от  $\tau_e/\tau_s$ , представленных соответственно на верхней и нижней панелях Рис. 5.14, согласуются с наблюдениями, полученными без селекции на спутниках *OGO 5* [173, Neugebauer, 1976], *Heos 2* [132, 175, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978; Neugebauer, 1981b], *Explorer 43* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985], *Ulysses*

[181, Neugebauer et al., 1994] и *Прогноз 7* [34, 252, 25, 246, Yermolaev et al., 1990; 1991; Ермолаев, 1994a,b]. Для всех типов течений солнечного ветра  $\Delta v$  и  $\Delta v/v_A$  антикоррелируют с отношением времени  $\tau_e/\tau_s$  в соответствии с гипотезой, что кулоновские столкновения ведут к уравниванию скоростей ионных компонент. Кривые для течений из CS и из CH, для CIR и MC - близки к друг другу, но кривая для HCS (в бесстолкновительной плазме с  $\tau_e/\tau_s \geq 0.3$ ) достигает более высоких значений  $\Delta v$ .

Данные о зависимости  $T_\alpha/T_p$  от  $\tau_e/\tau_s$ , представленной на Рис. 5.15, согласуются с наблюдениями, полученными без селекции на спутниках *IMP 6* [106, Feldman et al., 1974], *OGO 5* [173, Neugebauer, 1976], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* [34, 252, 25, 246, Yermolaev et al., 1990; 1991; Ермолаев, 1994a,b]. Для всех типов течений солнечного ветра  $T_\alpha/T_p$  антикоррелирует с отношением времени  $\tau_e/\tau_s$  в соответствии с гипотезой, что кулоновские столкновения ведут к уравниванию температур ионных компонент. Кривые для HCS и течений из CS - близки друг другу и проходят выше, чем кривые для других типов течений. Кривые для течений из CH и MC близки друг другу и идут между общей кривой HCS-CS и кривой для CIR.

Факт, что зависимости  $\Delta v$  от  $v_A$  (Рис. 5.12),  $\Delta v$  от  $\tau_e/\tau_s$  и  $\Delta v/v_A$  от  $\tau_e/\tau_s$  (Рис. 5.14) близки друг другу в течениях из CH и CS и отличаются от зависимостей в HCS, свидетельствует в пользу гипотезы, что процессы, приводящие к разности скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов, могут быть подобны друг другу в течениях из CH и CS и отличаться от процессов в HCS. Однако, Рис. 5.11 - 5.15 позволяют нам предположить, что процессы, которые ведут к преимущественному нагреву  $\alpha$ -частиц, вероятно, одинаковы в течениях из HCS и CS, но они отличаются от процессов в течениях из CH [25, 246, Ермолаев, 1994a,b]. Приход межпланетных ударных волн, CIR и MC сопровождается уменьшением разности скоростей и отношения температур  $\alpha$ -частиц и протонов. Сказанное выше о схожести и различиях физических процессов, описывающих поведение  $\alpha$ -частиц и протонов в солнечном ветре, суммировано в Табл. 5.4, в каждой строке которой одинаковые значки означают схожесть физических процессов в соответствующих типах солнечного ветра.

### 5.3 Проявление крупномасштабной структуры солнечного ветра в поведении тяжелых ионов

Как отмечалось во введении, химический состав и ионизационные состояния различных ионных составляющих практически не изменяются при движении солнечного ветра от солнечной короны до орбиты Земли. Поэтому приводимые ниже данные, с одной стороны, дают оценки таких параметров солнечной короны, как химический состав и ионизационные температуры, а с другой стороны, могут быть использованы в качестве тестовых результатов, позволяющих сделать вывод о том, связаны ли те или иные типы течений



Таблица 5.4: Сравнение физических процессов в разных типах солнечного ветра

Процесс	Область	Типы течений солнечного ветра				
		HCS	CS	CH	CIR	MC
Образование $n_\alpha/n_p$	солнечная корона	♡	♡	⊗	◇	△
Ускорение $\alpha$	солнечная корона и СВ	♡	♡	♡	◇	△
Выравнивание $v_\alpha$ и $v_p$	солнечный ветер	⊗	♡	♡	◇	△
Нагрев $\alpha$	солнечная корона и СВ	♡	♡	⊗	◇	△
Выравнивание $T_\alpha$ и $T_p$	солнечный ветер	♡	♡	⊗	◇	⊗

солнечного ветра с крупномасштабной структурой солнечной короны или ее крупномасштабными возмущениями.

### 5.3.1 Динамика среднечасовых значений содержания и ионизационных температур тяжелых ионов

Систематические наблюдения тяжелых ионов солнечного ветра проводились с помощью простого электростатического анализатора прибора СКС-04, ориентированного на Солнце (см. раздел 2.2.1), и по методическим ограничениям они регистрировались только в медленном ( $v_p \leq 450$  км/с) и холодном ( $T_p \leq 3 \cdot 10^5$  К) солнечном ветре. На Рис. 5.16 показаны периоды наблюдения тяжелых ионов на спутнике *Прогноз 7* для восьми оборотов Солнца (Каррингтоновские обороты NN 1986 - 1993) с ноября 1978 г. по июнь 1979 г.: двойной штриховкой отмечены дни, когда по первичной информации надежно регистрировались тяжелые ионы (т.е., когда в течение более 50% времени суток отсчеты, соответствующие тяжелым ионам, более чем в 10 раз, превышали средний уровень фона), простой штриховкой - дни со спорадическим наблюдением тяжелых ионов или их небольшим превышением уровня фона, пустыми клетками - дни, когда условия в течениях солнечного ветра не позволяли проводить измерения тяжелых ионов, а знаком "минус" показаны дни, когда при наличии благоприятных условий в солнечном ветре тяжелые ионы не регистрировались. На основании Рис. 5.16 можно заключить, что в 90% времени, когда условия в солнечном ветре позволяли измерять методом энергоанализа тяжелые ионы (1/3 полного времени всех наблюдений в солнечном ветре), они регистрировались, при этом в 60% этого времени регистрировались надежно и в 40% этого времени - спорадически. В ряде случаев тяжелые ионы регистрировались непрерывно в течение нескольких суток, при этом условия для их наблюдения могут сохраняться в течение нескольких оборотов Солнца

Таблица 5.5: Основные характеристики межпланетной среды в периоды детального изучения потоков тяжелых ионов солнечного ветра

Периоды наблюдения время / дата	20 UT / 16.11.78- 03 UT / 19.11.78	14 UT / 24.11.78- 20 UT / 25.11.78	13 UT / 02.12.78- 14 UT / 04.12.78	16 UT / 10.12.78- 06 UT / 13.12.78	00 UT / 06.02.79- 21 UT / 08.02.79	20 UT / 04.06.79- 04 UT / 06.06.79
$v_p$ , км/с	373±32	452±20	319±14	306±14	374±14	298±12
$v_\alpha$ , км/с	383±31	464±27	300±44	292±12	376±17	287±12
$T_p$ , 10 <sup>4</sup> K	5,3±2,8	10,0±12,7	5,8±3,8	3,1±1,5	5,8±2,1	3,1±1,5
$T_\alpha$ , 10 <sup>4</sup> K	6,2±4,4	35,1±33,7	5,7±4,3	3,7±3,1	26,5±11,0	5,1±2,2
$n$ , см <sup>-3</sup>	10,9±4,6	7,3±4,5	12,7±6,5	17,4±8,9	6,9±1,5	17,5±2,6
$n_\alpha/n_p$ , %	2,1±1,9	2,4±2,5	1,7±1,2	0,8±0,5	7,9±5,2	0,6±0,5
Тип потока	INS(CS)	INS(CS)	INS(CS)	NCDE(HCS)	HAЕ(CH)	NCDE(HCS)

[9, 258, 11, 28, Вайсберг и др., 1980а, 1984а; Zastenker and Yermolaev, 1981b; Ермолаев и Застенкер, 1990].

Для подробного изучения динамики элементного и зарядового состава солнечного ветра было выбрано шесть интервалов продолжительностью не менее 30 часов (16-19, 24-26 ноября, 2-4, 10-13 декабря 1978 г., 6-8 февраля и 4-6 июня 1979 г.), которые характеризовались достаточно низкими скоростью и температурой основных компонент солнечного ветра (см. Табл. 5.5). Кроме того, в указанные периоды углы между направлением потока ионов и осью зрения датчика были сравнительно небольшими, поэтому коэффициент при пересчете измеренной величины отсчета в величину отсчета при нормальном падении потока на анализатор не превышает 30 (см. раздел 2.3.2. и формулу 2.17). В этом случае влияние на результаты измерения изменения ориентации оси зрения датчика относительно вектора потока может быть учтено по описанной в разделе 2.3.2. методике, так что точность оценки величины потока отдельного сорта ионов на временном масштабе  $\sim 1$  час составляет не хуже 70%. Таким образом выбранные для подробного анализа временные интервалы в сумме составили 280 часов (12% времени проведения измерений в солнечном ветре или 23% времени наблюдения тяжелых ионов).

На верхней панели Рис. 5.17 - 5.22 показано изменение во времени содержания кислорода, кремния и железа (в скоростях счета детектора, пересчитанное к потоку ионов с нормальным падением на входную апертуру датчика). Динамика содержания кремния и железа относительно кислорода  $Si/O$  и  $Fe/O$  представлена на второй панели. На третьей панели показана динамика ионизационных температур, определенных по ионам кислорода  $T(O)$ , кремния  $T(Si)$  и железа  $T(Fe)$ . На следующих трех панелях даны гидродинамические параметры солнечного ветра: концентрация ионов  $n$ , кинетические температуры протонов и  $\alpha$ -частиц и их переносные скорости (параметры  $\alpha$ -частиц показаны штриховой линией). На Рис. 5.17 показан также средний разброс параметров тяжелых ионов на интервале усреднения (1

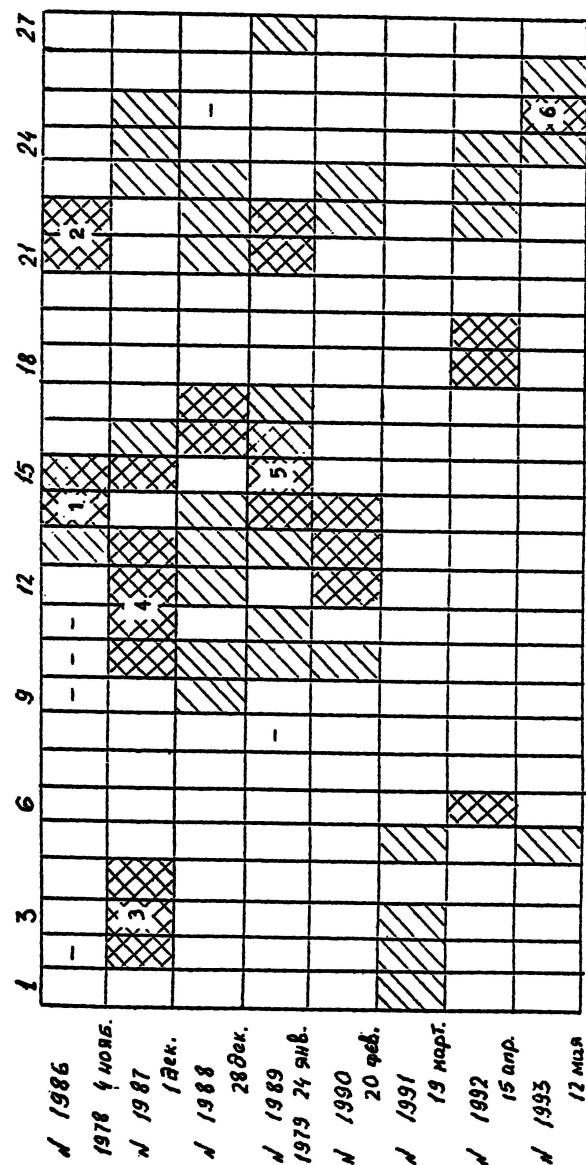


Рис. 5.16: Периоды наблюдения тяжелых ионов солнечного ветра по данным спутника *Прогноз 7* для восьми оборотов Солнца (номера и даты начала Каррингтоновских оборотов с 1986 по 1993 показаны слева). Обозначения: двойная штриховка - дни надежной и длительной регистрации тяжелых ионов; простая штриховка - дни спорадического наблюдения тяжелых ионов; прочерк - дни, когда тяжелые ионы не регистрировались; пустые клетки - дни, когда измерения не проводились или условия в солнечном ветре не позволяли наблюдать тяжелые ионы [28, Ермолаев и Застенкер, 1990].

или 2 часа). Средние значения гидродинамических параметров для периодов, представленных на Рис. 5.17 - 5.22, даны в Табл. 5.5, средние значения содержания и ионизационных температур тяжелых ионов - в Табл. 5.6 и 5.7, соответственно.

Определение типов течений солнечного ветра, соответствующих анализируемым периодам, первоначально (см. [28, Ермолаев и Застенкер, 1990]) было сделано в соответствии с принятой в работе [110, Fenimore, 1980] терминологией, которая позже была просто заменена терминологией, описанной в предыдущей главе. Условия в солнечном ветре в периоды, когда наблюдались малые ионные составляющие, в основном соответствуют двум типам явлений: (1) тип INS - так называемые "межструйные течения" (interstream по терминологии [110, Fenimore, 1980]) - медленные и холодные потоки между двумя быстрыми потоками солнечного ветра (см. Рис. 5.17 - 5.19) и (2) тип NCDE - "не связанное со сжатием увеличение плотности" (noncompressive density enhancement [110, Fenimore, 1980]) - холодные потоки с уменьшающейся или неизменной скоростью и с возрастающей концентрацией (см. Рис. 5.20 и 5.22). Как показывают соответствующие рисунки, течения INS являются течениями из корональных стримеров (CS), а течения NCDE - течениями типа гелиосферного токового слоя (HCS).

Кроме того, было обнаружено событие (см. Рис. 5.21), когда условия в солнечном ветре отличаются от течений типов CS и HCS. Средние значения гидродинамических параметров протонов для трех видов течений отличаются сравнительно мало (см. Табл. 5.5). Наибольшее различие наблюдается для средних значений концентрации  $n$ : для течений из CS она составляет 7,3-12,3 см<sup>-3</sup>, для HCS - 17,5 см<sup>-3</sup> и для третьего типа - 7 см<sup>-3</sup>. Основное отличие заключается в сравнительном поведении гидродинамических параметров  $\alpha$ -частиц и протонов и в динамике их изменения. В потоке третьего типа в среднем температура  $\alpha$ -частиц в 4,6 раза выше температуры протонов, в то время как лишь в сравнительно быстром и горячем течении 24-26 ноября 1978 г. отношение кинетических температур  $T_\alpha/T_p$  было 3,5, а в остальных четырех событиях  $T_\alpha/T_p$  составило от 1 до 1,7 (т.е. протонная и  $\alpha$ -составляющие были почти изотермичны). Также существенно различаются средние значения содержания  $\alpha$ -частиц в этих событиях: в течениях из CS  $n_\alpha/n_p$  составило 1,7-2,4% , в течениях HCS - 0,6-0,8% , а в потоке третьего типа - 7,9%, т.е. в 3 раза больше, чем в течениях из CS, и в 10 раз больше, чем в течениях HCS. Поэтому это течение может быть отнесено к типу HAE (helium abundance enhancement) [110, Fenimore, 1980]). Анализ дополнительных данных о магнитном поле позволяет определить тип течения в соответствии с нашей классификацией как течение из СН, в то же время высокое содержание гелия и других тяжелых ионов указывает на возможность того, что данный тип течения может быть отнесен к магнитному облаку, однако первый вариант кажется предпочтительнее.

Начало периода 16-19 ноября 1978 г. (см. Рис. 5.17) характеризуется постепенным уменьшением скорости солнечного ветра от величины 450 км/с

Таблица 5.6: Содержание ионов гелия, кислорода, кремния и железа в солнечном ветре

Содержание ионов	Наблюдения на спутнике <i>Прогноз 7</i>							среднее по данным ИСЗ серий Vela и Neos [118] Geiss, 1982
	20 UT / 16.11.78- 03 UT / 19.11.78	14 UT / 24.11.78- 20 UT / 25.11.78	13 UT / 02.12.78- 14 UT / 04.12.78	16 UT / 10.12.78- 06 UT / 13.12.78	00 UT / 06.02.79- 21 UT / 08.02.79	20 UT / 04.06.79- 04 UT / 06.06.79	среднее по шести периодам	
$He/H, 10^{-2}$	2,1±1,9	2,4±2,5	1,7±1,2	0,8±0,5	7,9±5,2	0,6±0,5	3,0±2,8	15,2 10,0 80 5±2 7,6±3,0
$O, 10^4$ имп/с	23±15	32±18	37±17	18±10	63±25	24±14	—	
$Si, 10^3$ имп/с	23±13	38±26	27±13	20±13	79±37	25±18	—	
$Fe, 10^3$ имп/с	14±11	—	17±11	15±06	49±21	29±16	—	
$Si/O, 10^{-2}$	11,8±9,7	11,7±5,3	10,6±6,4	12,0±6,2	14,0±6,8	10,2±3,1	12,0±6,5	
$Fe/O, 10^{-2}$	6,5±4,1	—	5,3±3,3	9,8±5,2	8,1±4,5	11,5±5,7	8,1±4,5	80 5±2
$He/O$	46±35	49±54	32±23	28±18	45±33	38±33	39±31	
$O/H, 10^{-4}$	4,6	4,9	5,3	2,9	17,6	1,6	6,8±5,6	7,6±3,0
$Si/H, 10^{-5}$	** 2,8	** 3,2	** 2,3	** 1,1	** 10,5	** 0,8	** 4,0	
	5,4	5,7	5,6	3,4	24,6	1,6	8,6±8,2	
	* 5,9	* 5,8	* 5,3	* 6,0	* 7,0	* 5,1	* 6,0	
	** 3,3	** 3,7	** 2,4	** 1,3	** 14,7	** 0,8	** 5,2	
$Fe/H, 10^{-5}$	3,0	—	2,8	2,8	14,2	1,8	5,5±4,9	5±3
	* 3,3	—	* 2,7	* 4,9	* 4,1	* 5,8	* 4,1	
	** 1,8	—	** 1,2	** 1,0	** 8,5	** 0,9	** 3,1	

Таблица 5.7: Ионизационные температуры ионов кислорода, кремния и железа в солнечном ветре

Ионизац. Температура, 10 <sup>6</sup>	Наблюдения на спутнике <i>Прогноз 7</i>										Серия ИСЗ Vela, в холодном СВ [75] Vame et al., 1979
	20 UT / 16.11.78- 03 UT / 19.11.78	14 UT / 24.11.78- 20 UT / 25.11.78	13 UT / 02.12.78- 14 UT / 04.12.78	16 UT / 10.12.78- 06 UT / 13.12.78	00 UT / 06.02.79- 21 UT / 08.02.79	20 UT / 04.06.79- 04 UT / 06.06.79	среднее по шести периодам				
$T(O^+/O^6)$	3,06±0,65	2,83±0,83	3,14±0,45	2,95±0,60	2,89±0,65	2,82±0,61	2,92±0,62	1,7 - 2,2			
$T(Si^9/Si^8)$	1,92±0,81	2,01±0,75	2,05±0,66	2,02±0,41	2,44±0,75	2,15±0,67	2,11±0,66				
$T(Si^8/Si^7)$	1,42±0,57	1,26±0,55	1,45±0,41	1,28±0,28	1,47±0,59	1,70±0,56	1,41±0,47				
средн. $T(Si)$	1,72±0,32	1,68±0,24	1,78±0,39	1,65±0,24	1,95±0,38	1,88±0,45	1,78±0,33				
$T(Fe^{13}/Fe^{12})$	2,36±0,86	2,61±1,18	2,51±0,78	2,26±0,64	2,55±1,22	2,95±1,86	2,49±0,98				
$T(Fe^{12}/Fe^{11})$	1,98±0,65	—	2,31±0,61	2,01±0,98	2,48±1,16	2,13±1,27	2,20±0,93				
$T(Fe^{11}/Fe^{10})$	1,58±0,67	—	1,66±0,53	1,36±0,41	1,58±0,73	2,08±1,21	1,60±0,65				
$T(Fe^{10}/Fe^9)$	1,48±0,59	—	1,63±0,35	1,38±0,35	1,66±0,67	1,48±0,85	1,52±0,52				
$T(Fe^9/Fe^8)$	1,38±0,63	—	1,53±0,39	1,48±0,38	1,74±0,61	1,53±0,85	1,52±0,53				
$T(Fe^8/Fe^7)$	1,85±0,45	—	1,28±0,43	1,64±0,35	1,25±0,31	1,44±0,12	1,34±0,50				
$T(Fe^7/Fe^6)$	0,68±0,33	—	0,77±0,26	1,17±0,33	—	1,15±0,71	0,96±0,37				
средн. $T(Fe)$	1,59±0,26	—	1,70±0,15	1,58±0,10	1,82±0,21	1,63±0,29	1,66±0,17	1,46±0,15			

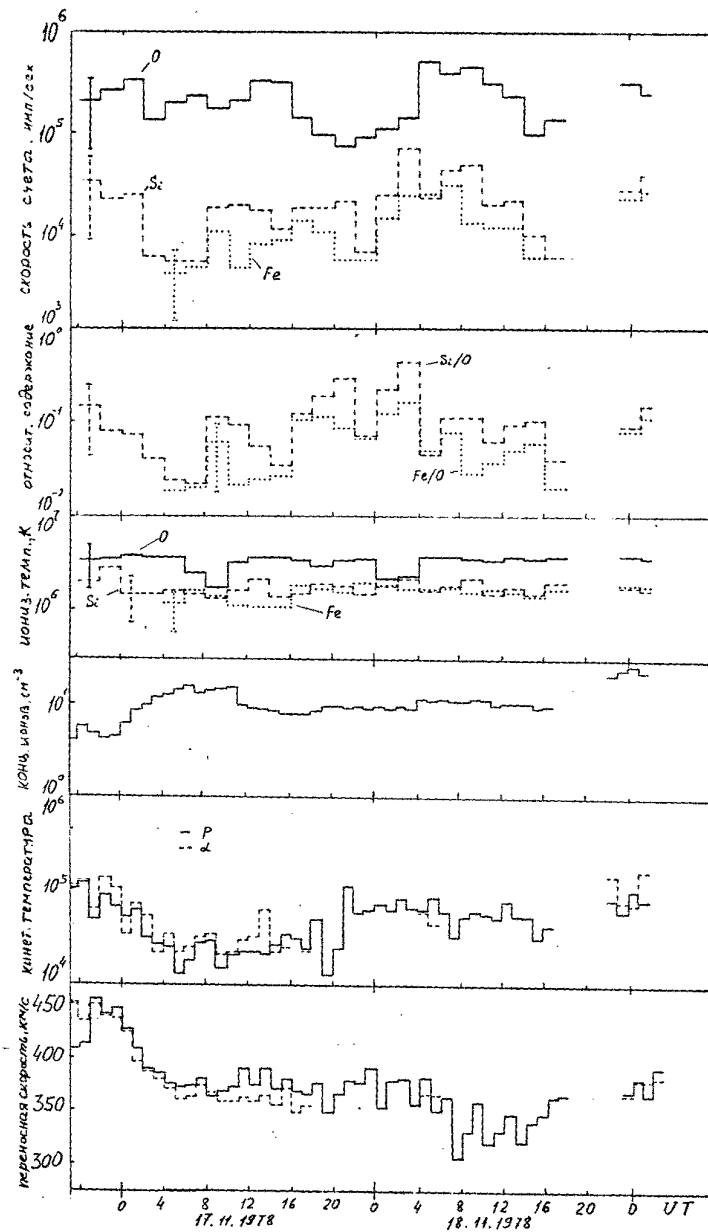


Рис. 5.17: Динамика для периода 16-19 ноября 1978 г. 1) содержания кислорода, кремния и железа (в скоростях счета детектора), 2) содержания кремния и железа относительно кислорода, 3) ионизационных температур ионов кислорода, кремния и железа, 4) концентрации ионов, 5) кинетической температуры  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha$  (пунктирная линия) и  $T_p$  (сплошная линия) и 6) их переносных скоростей  $v_\alpha$  (пунктирная линия) и  $v_p$  (сплошная линия) по данным спутника *Прогноз 7* [28, Ермолаев и Застенкер, 1990].

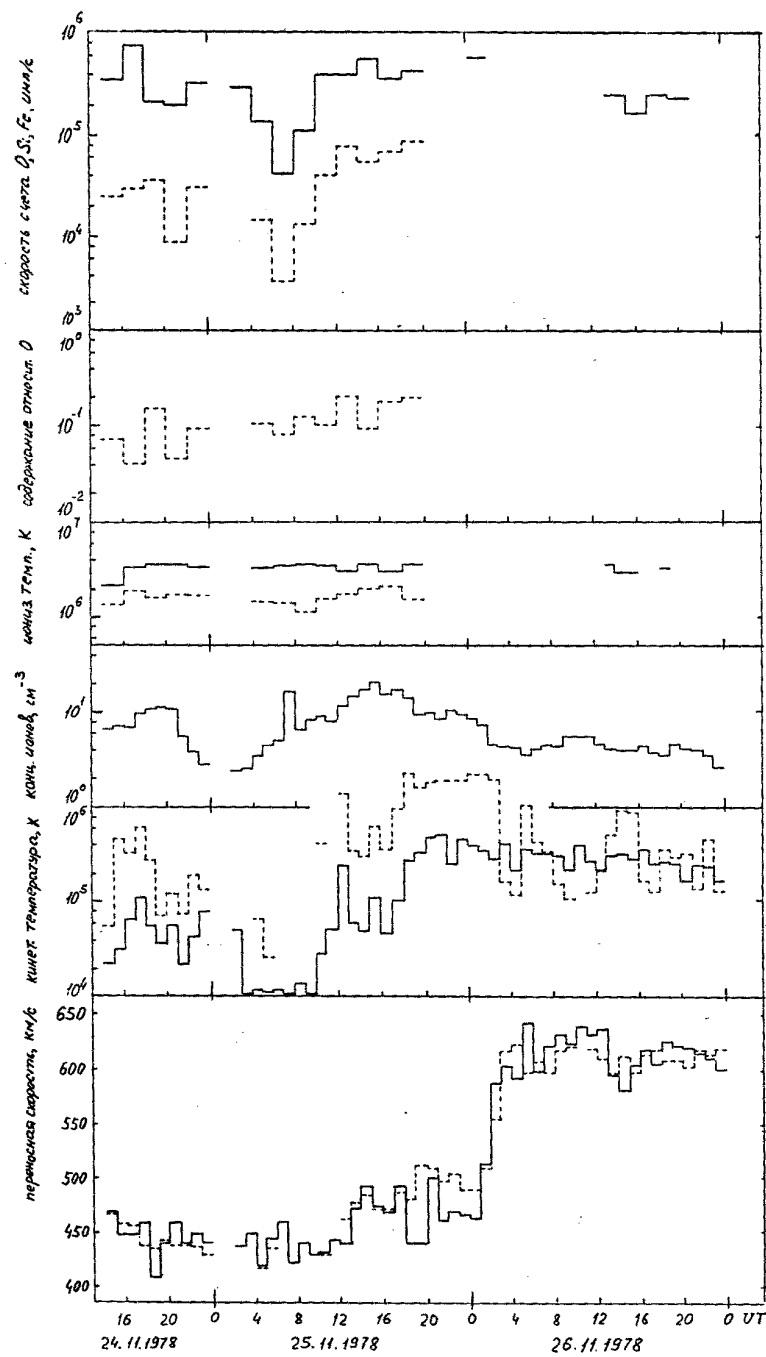


Рис. 5.18: То же, что на рис. 5.17, для периода 24-25 ноября 1978 г.



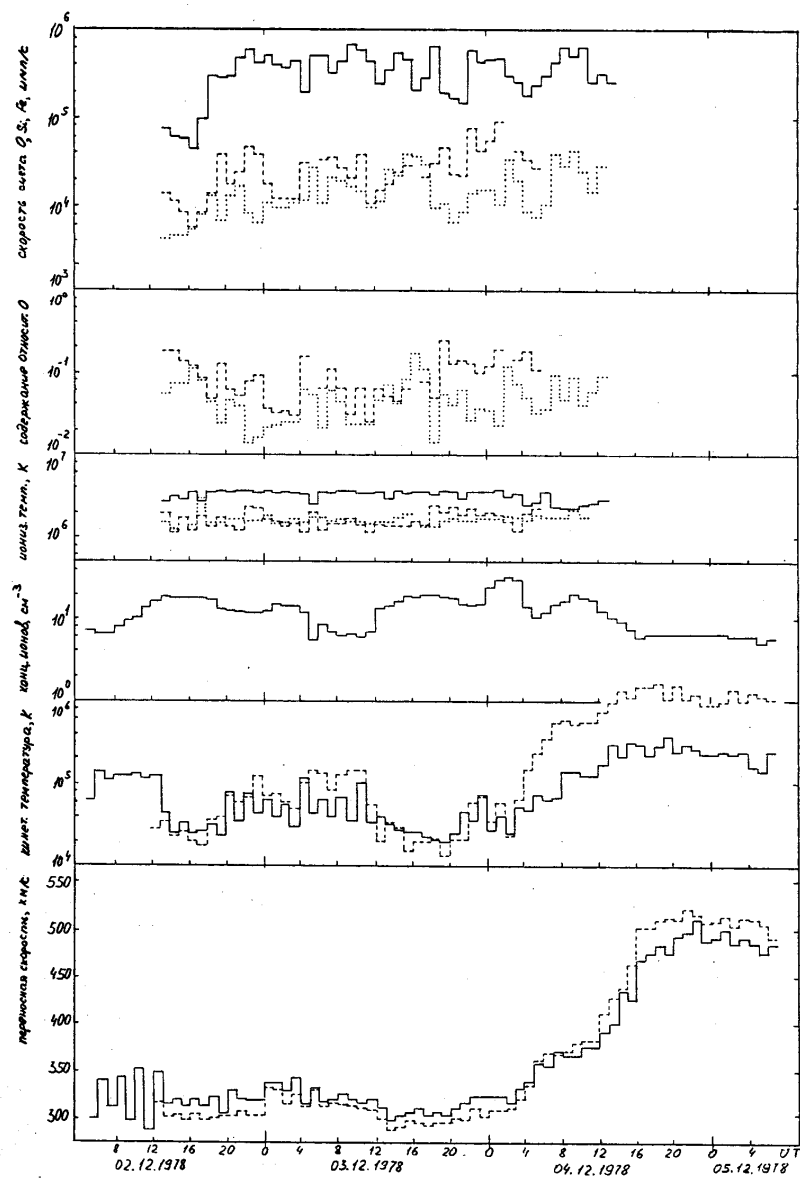


Рис. 5.19: То же, что на рис. 5.17, для периода 2-5 декабря 1978 г.

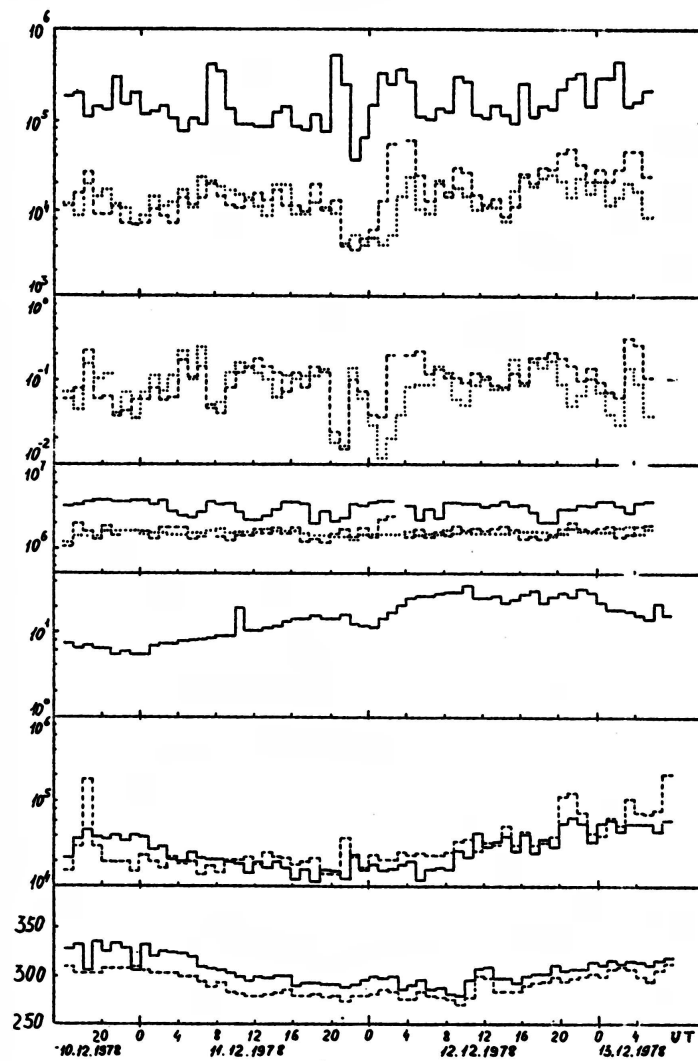


Рис. 5.20: То же, что на рис. 5.17, для периода 10-13 декабря 1978 г.

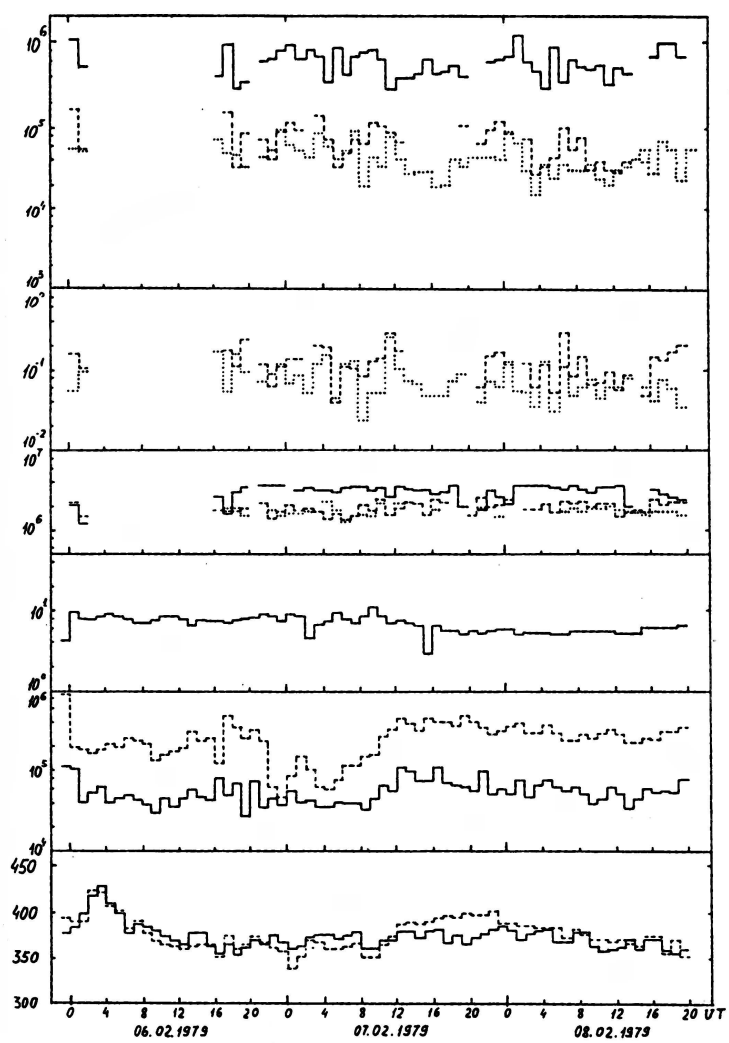


Рис. 5.21: То же, что на рис. 5.17, для периода 6-8 февраля 1979 г.

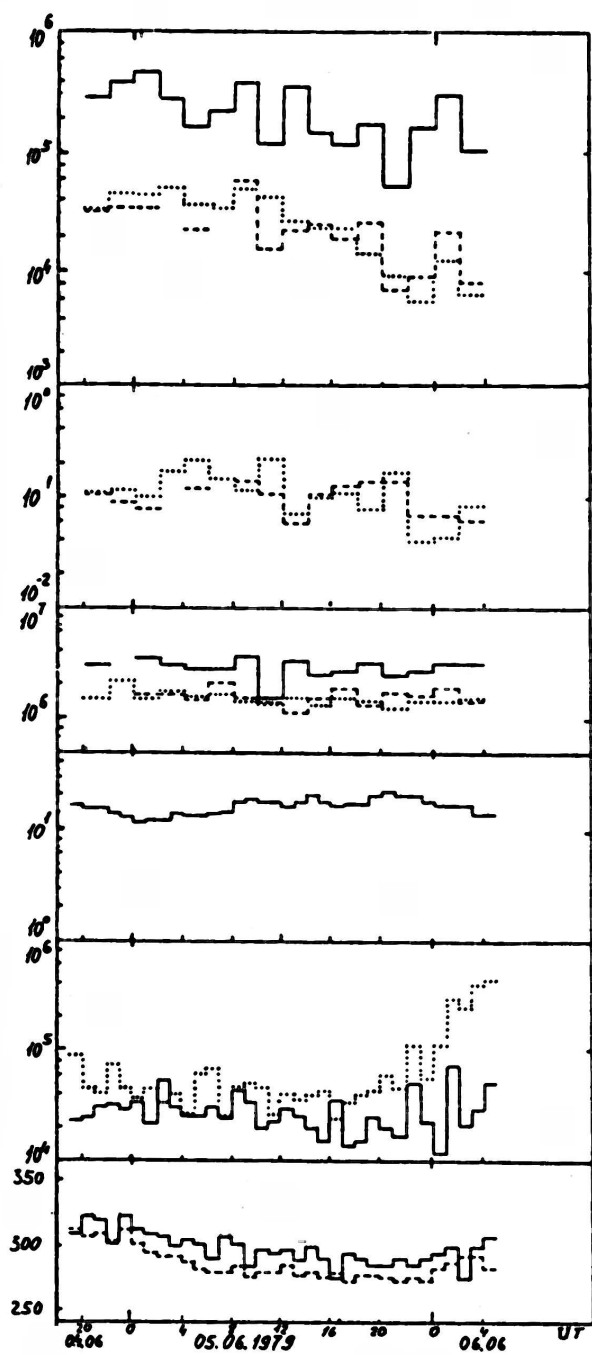


Рис. 5.22: То же, что на рис. 5.17, для периода 4-5 июня 1979 г.

до 350 км/с с одновременным охлаждением потока от  $10^5\text{K}$  до  $3\cdot 10^4\text{K}$  и возрастанием плотности от 4 до  $15\text{ см}^{-3}$ . На этом временном интервале (00-08 UT 17.11.1978 г.) наблюдается уменьшение абсолютного и относительного содержания кремния и железа  $n(\text{Si})$ ,  $n(\text{Fe})$ ,  $n(\text{Si})/n(\text{O})$  и  $n(\text{Fe})/n(\text{O})$ . Далее на интервале 08 UT 17.11.1978 - 00 UT 19.11.1978 г. скорость потока медленно уменьшается, температура медленно возрастает, а концентрация почти не изменяется. На этом интервале медленного изменения гидродинамических параметров корреляции содержания тяжелых ионов с параметрами потока не наблюдается. На всем интервале, представленном на Рис. 5.17, вариации ионизационных температур, усредненных по всем парам ионов кислорода, кремния и железа, не превышают неопределенности оценок этих параметров.

Представленные на Рис. 5.18 и 5.19 (соответственно, для 24-26 ноября и 2-4 декабря 1978 г.) данные так же, как и на предыдущем рисунке, относятся к течениям из CS. Различие заключается лишь в том, что спутник последовательно регистрировал прохождение медленных и быстрых течений солнечного ветра. В обоих случаях на фазе нарастания скорости течения (12 UT 25.11.78. - 04 UT 26.11. 78 и 00 UT - 16 UT 04.12.78, соответственно) наблюдается возрастание температур протонов и  $\alpha$ -частиц  $T_p$  и  $T_\alpha$  и полной концентрации ионов  $n$ . Такое поведение параметров характерно для области взаимодействия быстрого и медленного течений [125, Gosling et al., 1978]. Как видно из рисунков, участки высокой скорости течений не позволяют определять параметры тяжелых ионов из-за методических ограничений прибора, а участки роста скорости составляют сравнительно небольшую долю полной длины интервалов, и поэтому полученные оценки химического состава и ионизационной температуры могут быть отнесены к типам течений из CS. На отмеченных выше участках роста скорости течений существует корреляция потоков ионов кислорода, кремния и железа и полной концентрации  $n$ . Также как и на предыдущем рисунке, на Рис. 5.18 и 5.19 существенных изменений ионизационных температур тяжелых ионов не наблюдается.

На Рис. 5.20 и 5.22 приведены два случая (10-13.12.1978 г. и 04-06.06.1979 г.) наблюдения тяжелых ионов в течениях HCS. Эти течения характеризуются низкими скоростями и температурами и возрастающей концентрацией  $n$ . В интервале 10-13 декабря, по-видимому, существует слабая корреляция между потоками ионов кислорода, кремния и железа и полной концентрацией  $n$ , которая возрастает в  $\sim 6$  раз. В то же время на участке 04-06 июня наблюдается уменьшение потоков этих ионов при слабом возрастании концентрации  $n$  (от 12 до  $18\text{ см}^{-3}$ ). Существенных изменений ионизационных температур тяжелых ионов в эти периоды не наблюдалось.

Несмотря на отмеченные выше отличия гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц в период 06-08.02.1979 г. (см. Рис. 5.21) от других периодов, поведение потоков и ионизационных температур тяжелых ионов близко к их поведению в течениях HCS: наблюдается слабая корреляция содержания кислорода, кремния и железа и полной концентрации ионов, и отсутствуют

заметные вариации ионизационных температур тяжелых ионов.

Таким образом, по динамике поведения среднечасовых значений параметров тяжелых ионов на временных интервалах от 1 часа до 3 суток в рассмотренных 6 случаях могут быть сделаны следующие выводы:

- ионизационные температуры тяжелых ионов остаются примерно постоянными в пределах неопределенности их оценок ( $\sim 30\%$ ),
- величины потоков ионов кислорода, кремния и железа и их относительные содержания варьируют в пределах, превышающих в несколько раз неопределенность их оценки, и примерно одинаково для разных ионов, изменчивость потоков тяжелых ионов значительно выше, чем изменчивость потока протонов,
- временная характеристика изменчивости потоков тяжелых ионов, оцененная по времени спада автокорреляционной функции, составляет в среднем 1-3 часа [260, Zastenker et al., 1991], что заметно меньше, чем оценка, полученная в работе [80, Bochslers, 1987] для периода изменчивости потоков кислорода  $\sim 15$  часов.

В условиях ограниченного объема и высокой изменчивости экспериментальных данных можно высказать лишь некоторые предположения о наличии корреляции между изменениями потоков тяжелых ионов и изменениями скорости и полной концентрации ионов солнечного ветра:

- на участках уменьшения скорости течения солнечного ветра потоки и относительное содержание тяжелых ионов коррелирует с изменением скорости и/или антикоррелирует с изменением полной концентрации,
- на участках возрастания скорости течения содержание тяжелых ионов, возможно, коррелирует с изменением полной концентрации,
- на участках постоянства или медленного изменения скорости течения содержание тяжелых ионов, по-видимому, коррелирует с изменением полной концентрации ионов.

### 5.3.2 Вариации содержания и ионизационных температур тяжелых ионов в потоках различного типа

Для изучения вариаций параметров тяжелых ионов на временных масштабах, превышающих сутки, рассмотрим подробнее Табл. 5.6 и 5.7, на которых представлены средние за указанные выше 6 периодов наблюдений значения содержания и ионизационной температуры, соответственно.

В Табл. 5.6 приведены средние по каждому из шести периодов значения относительного содержания гелия  $n(He)/n(H)$ , определенные по данным селективного анализатора прибора СКС-04, при этом среднее по 6 периодам низкоскоростного солнечного ветра составляет  $3.0 \pm 2.8\%$ , в то время как за все время наблюдений на спутнике *Прогноз 7* среднее содержание гелия составило  $5.4 \pm 3.9\%$  (см. раздел 3.1 и Табл. 3.1). Последний факт согласуется с упомянутыми ранее данными (см. раздел 3.4 и Табл. 3.8) о том, что относительное содержание гелия возрастает с увеличением скорости солнечного

ветра. В Табл. 5.6 даны также средние значения потоков кислорода, кремния и железа и относительной концентрации  $n(Si)/n(O)$  и  $n(Fe)/n(O)$  для шести временных интервалов. Средние значения  $n(Si)/n(O)$  и  $n(Fe)/n(O)$  мало меняются от интервала к интервалу и хорошо согласуются с ранее полученными средними оценками этих величин для совокупности различных течений солнечного ветра (см. последний столбец Табл. 5.6).

На каждом временном интервале по данным простого и селективного анализаторов СКС-04 оценивались средние значения содержания гелия относительно кислорода  $n(He)/n(O)$ , которые также представлены в Табл. 5.6. Оценки этого параметра были получены со сравнительно высокой неопределенностью, которая на временном масштабе  $\sim 1$  суток составляет 70-80%. Приведенные в верхних 7 строчках данные Табл. 5.6 позволяют получить на каждом интервале оценки содержания кислорода, кремния и железа относительно водорода  $n(O)/n(H)$ ,  $n(Si)/n(H)$  и  $n(Fe)/n(H)$  по формуле (2.18), приведенной в разделе 2.4.

Так как оценки величин  $n(He)/n(H)$  и  $n(He)/n(O)$  получены со сравнительно невысокой точностью, в Табл. 5.6 представлены также оценки содержания кислорода, кремния и железа относительно водорода, полученные двумя другими способами. В первом случае, оценки для которого отмечены в Табл. 5.6 одной звездочкой, было использовано среднее значение кислорода в солнечном ветре  $n(O)/n(H) = (5 \pm 2) \cdot 10^{-4}$  [119, Geiss, 1985] и из содержания ионов относительно кислорода было определено содержание этих ионов относительно водорода по формуле (2.19). Во втором случае, оценки для которого отмечены в Табл. 5.6 двумя звездочками, было использовано среднее содержание гелия относительно кислорода  $n(He)/n(O) = 75 \pm 20$ , определенное методом масс-анализа на спутнике *ISEE 3* [81, Bochsler et al., 1986], и среднее содержание гелия относительно водорода по данным спутника *Прогноз 7*, и содержание тяжелых ионов относительно водорода определялось по формуле (2.20).

Полученные этими двумя способами оценки содержания кислорода, кремния и железа относительно водорода для отдельных интервалов заметно отличаются от оценок, полученных полностью по данным прибора СКС-04, при этом оценки, полученные вторым способом, оказываются систематически ниже, так как наши оценки  $n(He)/n(O)$  (в среднем оно составляет  $39 \pm 31$ ) оказываются ниже аналогичной величины, определенной по данным спутника *ISEE 3*. Однако в среднем оценки, полученные тремя способами, в пределах статистического разброса совпадают с полученными ранее оценками [119, Geiss, 1985].

Сравнение данных о содержании тяжелых ионов, усредненных по каждому из 6-ти интервалов, с гидродинамическими параметрами дает ценную информацию об условиях в течении солнечного ветра, влияющих на его химический состав, на временных масштабах от  $\sim 1$  суток и более. Зависимости от полной концентрации ионов содержания гелия, кислорода, кремния и железа

относительно кислорода и относительно водорода показаны соответственно на Рис. 5.23а и 5.23б. Из Рис. 5.23а следует, что при изменении полной концентрации ионов соотношения между содержанием ионов гелия, кислорода, кремния и железа сохраняются неизменными. Содержание тех же элементов относительно водорода заметно уменьшается с ростом полной концентрации. (Данные Табл. 5.6 позволяют также предположить, что с ростом полной концентрации уменьшаются и абсолютные потоки тяжелых ионов, однако точность определения абсолютных потоков ионов с помощью прибора СКС-04 невысока, и это предположение требует уточнения.) Так как изменение средней скорости потока от одного интервала к другому значительно меньше, чем изменение концентрации, то представленные на Рис. 5.23 зависимости могут рассматриваться и как зависимости от величины потока  $nv_p$ . В этом случае представленная зависимость для  $n(He)/n(H)$  согласуется как с результатами других экспериментов, так и с результатами, полученными на спутнике *Прогноз 7* по всему объему данных (см. Рис. 3.20). Уменьшение содержания ионов кислорода, кремния и железа при увеличении концентрации (или потока) было установлено нами впервые [28, Ермолаев и Застенкер, 1990], при этом уменьшение содержания более тяжелых ионов происходит, по-видимому, несколько медленнее, чем содержание гелия.

Для объяснения такого поведения относительного содержания гелия  $n(He)/n(H)$  при изменении гидродинамических параметров потока рассмотрим качественную модель, которая предложена в работе [127, Gosling et al., 1981] и которая может быть проиллюстрирована на Рис. 5.24. На этом рисунке схематически показана проекция коронального стримера на плоскость эклиптики. За счет замкнутой конфигурации магнитного поля имеют место два факта: (1) образуется медленное, холодное и плотное течение солнечного ветра, (2) происходит накопление тяжелых ионов за счет их более медленной диффузии поперек силовых линий магнитного поля, чем протонов. Качественное поведение полной концентрации ионов и относительного содержания гелия при пересечении космическим аппаратом области стримера на орбите Земли показано в правой части Рис. 5.24. Приведенные выше данные показывают, что и более тяжелые ионы, чем  $\alpha$ -частицы, ведут себя аналогичным образом. Событие типа НАЕ(СН), характеризующееся высоким содержанием малых ионных составляющих и отличающееся от других событий поведением гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц, может быть связано с прохождением мимо спутника обогащенного тяжелыми ионами плазменного облака, образовавшегося в более глубоких слоях солнечной атмосферы и вышедшего в межпланетное пространство за счет открытых магнитных силовых линий или за счет динамического процесса типа выброса корональной массы.

Средние значения ионизационных температур для всех типов потоков составили для кислорода  $T(O) = (2.9 \pm 0.6) \cdot 10^6 K$ , для кремния  $T(Si) = (1.7 \pm 0.3) \cdot 10^6 K$  и для железа  $T(Fe) = (1.6 \pm 0.2) \cdot 10^6 K$ , при этом



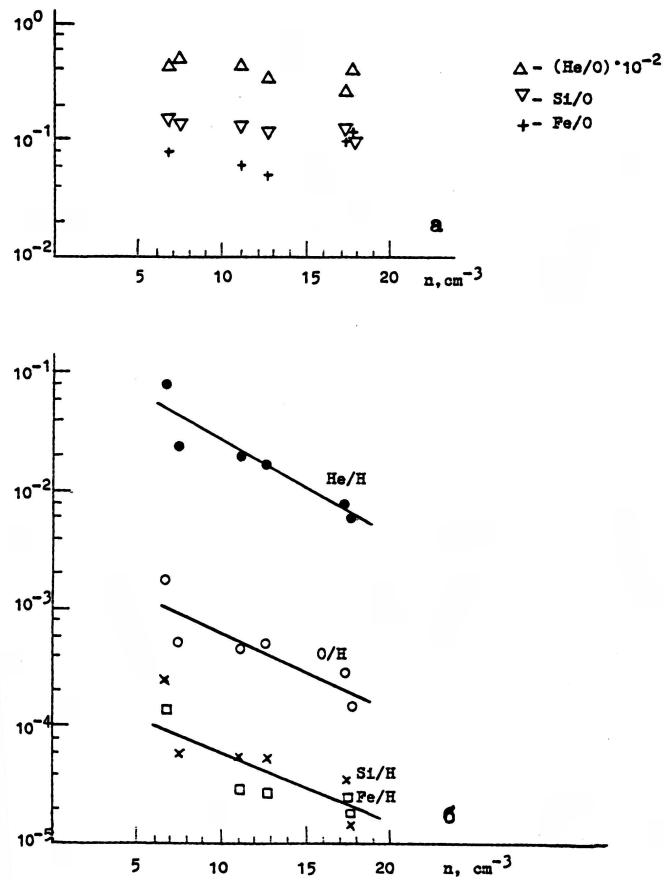


Рис. 5.23: Зависимость от полной концентрации ионов солнечного ветра содержания гелия, кислорода, кремния и железа а) относительно кислорода и б) относительно водорода. Данные спутника *Прогноз 7* [28, Ермолаев и Застенкер, 1990].

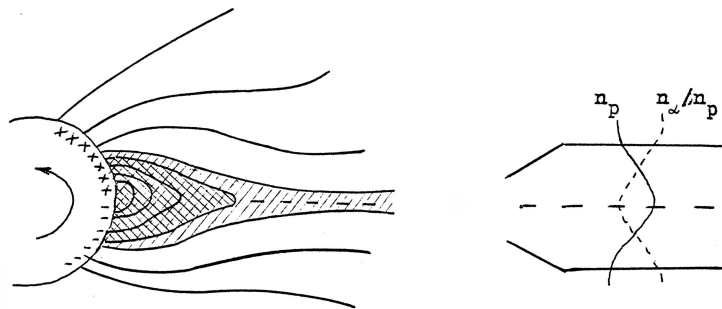


Рис. 5.24: Схематическое изображение магнитных силовых линий, а также распределения концентрации протонов  $n_p$  и относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  в области коронального стримера (по модели [127, Gosling et al., 1981]).

существенных различий в средних ионизационных температурах для разных типов течений солнечного ветра не наблюдалось (см. Табл. 5.7). Наши оценки средней ионизационной температуры, определенной по ионам железа,  $T(Fe)$  хорошо согласуются с результатами, полученными методом энерго-анализа на спутниках серии *Vela*  $(1.4 \pm 0.15) \cdot 10^6 K$  [75, Vame et al., 1979]. Полученные по данным спутника *Прогноз 7* оценки ионизационной температуры кремния  $T(Si)$  близки к оценкам  $T(Fe)$ . Аналогичные данные по другим экспериментам в литературе отсутствуют.

Более сложная картина возникает при сопоставлении с результатами оценок ионизационной температуры кислорода  $T(O)$ . Основная трудность заключается в том, что пики наиболее обильных ионов кислорода  $O^{+7}$  и  $O^{+6}$  измеряются на высокоэнергичном склоне пика ионов  $He^{+2}$ , и оценки  $T(O)$  оказываются чувствительными к методике учета вклада ионов  $He^{+2}$  в потоки ионов  $O^{+7}$  и  $O^{+6}$ . Результаты, полученные методом энерго-анализа на спутниках серии *Vela* для "холодных" спектров тяжелых ионов, обычно наблюдаемых в потоках типа INS и NCDE (или CS и HCS по нашей классификации), дают оценки  $T(O) = (1.7 - 2.2) \cdot 10^6 K$ , а для "горячих" спектров, обычно наблюдаемых в потоках типа HAE или в послевспышечной плазме, -  $3.4 \cdot 10^6 K$  [75, Vame et al., 1979]. По данным масс-спектрометра на спутнике *ISEE 3* было обнаружено, что в диапазоне низких скоростей солнечного ветра (300-450 км/с) ионизационная температура кислорода постоянна и составляет  $\sim 1.8 \cdot 10^6 K$ , при дальнейшем увеличении скорости  $T(O)$  растет и при скорости 550 км/с достигает величины  $\sim 3 \cdot 10^6 K$  [189, Ogilvie and Vogt, 1980]. Однако в последней работе [187, Ogilvie, 1985] отмечалось, что в быстрых потоках солнечного ветра возрастает кинетическая температура  $\alpha$ -частиц и поэтому в таких потоках увеличение ионизационной температуры кислорода может быть связано с методическими эффектами. По результатам измерений на спутнике *ISEE 1* энергичных ионов группы CNO, отраженных от околоземной ударной волны, была оценена ионизационная температура, которая в среднем составила для низкоскоростных потоков  $\sim 1.8 \cdot 10^6 K$ , а для потоков со скоростью более 420 км/с -  $(2.2 \pm 0.3) \cdot 10^6 K$ , в частности, в период 15.12.1978 г., близкий к четвертому интервалу наблюдений на спутнике *Прогноз 7*, при скорости солнечного ветра  $\sim 470$  км/с ионизационная температура ионов CNO составила  $(2.5 \pm 0.3) \cdot 10^6 K$  [116, Galvin et al., 1984].

Оценка  $T(O) = (2.9 \pm 0.6) \cdot 10^6 K$ , полученная по данным прибора SKC-04 на спутнике *Прогноз 7*, основывается на соотношении измеренных пиков  $O^{+7}/O^{+6} \sim 3$  (при сделанных предположениях и используемой методике обработки данных отношение скоростей счета в пиках ионов равно отношению содержания этих ионов) и на результатах расчетов ионизационного равновесия [63, Allen and Dupree, 1969]. Поэтому источники различий в оценке  $T(O)$  для различных экспериментов могут быть следующие.

1. Оценки  $T(O)$  по данным спутников *Vela* проводились с использованием модели [150, Jordan, 1969], которая дает близкие результаты по сравнению

с моделью [63, Allen and Dupree, 1969]. Оценки  $T(O)$  по данным спутника *ISEE 3* проводились по модели [220, Shull and Van Steenberg, 1982], которая при отношении содержания в пиках  $O^{+7}/O^{+6} \sim 3$  вместо  $T(O) = 2.9 \cdot 10^6 \text{K}$  дает меньшее значение ионизационной температуры  $T(O) = 2.7 \cdot 10^6 \text{K}$ , т.е. разница в оценках  $T(O)$  по моделям [150, 63, Jordan, 1969; Allen and Dupree, 1969] и по модели [220, Shull and Van Steenberg, 1982] составляет  $\sim 0.2 \cdot 10^6 \text{K}$ .

2. При измерении методом масс-анализа на спутнике *ISEE 3* вклад ионов  $He^{+2}$  в пик  $O^{+7}$  значительно уменьшается за счет селекции ионов по массе. При измерении методом энерго-анализа на спутниках *Vela* вклад ионов  $He^{+2}$  в пик  $O^{+7}$  может быть сравнительно легко учтен путем экстраполяции измеренного пика  $He^{+2}$  в диапазоне энергий пика  $O^{+7}$ . При измерении методом энерго-анализа на спутнике *Прогноз 7* учет вклада пика  $He^{+2}$  в пик  $O^{+7}$  осложнен тем, что форма пика  $He^{+2}$  оценивалась по данным селективного анализатора, а параметры пика  $O^{+7}$  – по данным простого анализатора (в этом датчике пик  $He^{+2}$ , как правило, находится "в зашкале"). За счет более узких угловых и энергетических характеристик селективного анализатора по сравнению с неселективным анализатором использованная методика может не учитывать полный вклад ионов  $He^{+2}$  в пик  $O^{+7}$ . Оценки показывают, что при самых неблагоприятных условиях (большой угол отклонения осей датчиков от направления прихода потока тяжелых ионов и высокая температура гелиевого пика) высота пика  $O^{+7}$  может оказаться в действительности на  $\sim 30\%$  меньше, чем полученная по использованной методике. Указанный эффект почти не влияет на определение высоты пика  $O^{+6}$ . В этом случае отношение содержания ионов  $O^{+7}/O^{+6}$  может оказаться меньше, что приведет к уменьшению  $T(O)$  до величины  $\sim 2.6 \cdot 10^6 \text{K}$  по модели [63, Allen and Dupree, 1969] и  $\sim 2.4 \cdot 10^6 \text{K}$  по модели [220, Shull and Van Steenberg, 1982] и уменьшению оценки содержания кислорода на  $\sim 20\%$ . Так как подробно анализировались только периоды с низкими кинетическими температурами протонов и ионов  $He^{+2}$  (см. Табл. 5.5), а потоки малых ионных составляющих в рассматриваемые периоды были большими, что указывает на близость направления их прихода к направлению осей датчиков, по-видимому, влияние этого эффекта на оценку содержания иона  $O^{+7}$  в изучаемые периоды оказывается значительно меньше.

3. На Рис. 2 в работе [155, Kunz et al., 1983], в которой используются также как и в работе [187, Ogilvie, 1985] данные со спутника *ISEE 3*, приводится пример массового спектра. Из этого спектра следует, что соотношение между высотами пиков  $O^{+7}/O^{+6} \sim 4$ , однако приводимая для данного спектра оценка  $T(O)$  составляет  $\sim 2.4 \cdot 10^6 \text{K}$ , в то время как, если считать отношение высот пиков равным отношению содержания этих ионов, то оценка  $T(O)$  по модели [220, Shull and Van Steenberg, 1982] должна составлять  $\sim 3.0 \cdot 10^6 \text{K}$ . Кроме того, из приведенного графика (Рис. 1) в работе [189, Ogilvie and Vogt., 1980] следует, что отношение содержаний  $n(O^{+7})/n(O^{+6}) \sim 3$  соответствует  $T(O) \sim 2.4 \cdot 10^6 \text{K}$ , в то время как по модели [150, Jordan, 1969] это соответствует  $T(O) \sim 2.9 \cdot 10^6 \text{K}$  и по модели [220, Shull and Van Steenberg, 1982]  $T(O) \sim 2.7 \cdot 10^6 \text{K}$ . Поэтому, возможно,

что при обработке данных спутника *ISEE 3* используется методика определения по массовым спектрам содержания тяжелых ионов, которая отличается от методики, использованной при обработке данных спутника *Прогноз 7*.

Рассмотренные выше эффекты могут привести к тому, что оценки ионизационной температуры кислорода по данным спутников *Vela*, *ISEE 3* и *Прогноз 7* (с учетом неопределенностей оценок) не будут противоречить друг другу.

Различия ионизационных температур, полученных в предположении ионизационного равновесия по различным парам ионов данного химического элемента, определяются тем, что различные ионизационные состояния "замораживаются" на разных высотах в солнечной короне, и поэтому они могут дать информацию о температурном градиенте в короне [72, Vame et al., 1974]. Как уже отмечалось в теоретическом обзоре, ряд предположений, которые для упрощения делаются при расчетах ионизационного равновесия, могут нарушаться. Поэтому связь между зарядовыми состояниями ионов солнечного ветра и распределением температуры в солнечной атмосфере может зависеть от некоторых физических параметров в области выхода ионов солнечной атмосферы в межпланетное пространство [197, 196, 198, 87, Owocki and Scudder, 1983; Owocki and Hundhausen, 1983; Owocki and Holzer, 1983; Burgi and Geiss, 1986] и может быть более сложной, чем предполагалось в работе [72, Vame et al., 1974]. Однако, если предположить, что при формировании всех трех видов течений солнечного ветра "замораживание" различных ионов железа происходит на одних и тех же высотах, то данные Табл. 5.7 позволяют предположить, что (1) для течений из CS изменение  $T(Fe)$  с высотой более монотонно, чем для других двух типов, и  $T(Fe)$  имеет несколько более низкие значения на больших высотах над поверхностью Солнца; (2) для течений типов HCS и HAE(CH), например,  $T(Fe)$  меняется на малых высотах более круто, чем для течений из CS, а на больших высотах – наоборот, менее круто.

### 5.3.3 Наблюдения ионов $He^+$ в потоке, связанном с инжекцией корональной массы

По результатам измерений, выполненных с помощью комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* 30 апреля 1985 г., наблюдалось необычное явление в солнечном ветре. Необычность этого явления заключалась, во-первых, в редко наблюдаемых величинах гидродинамических параметров течения и, во-вторых, в составе ионной компоненты солнечного ветра [33, Ермолаев и др., 1989].

По геомагнитным данным в 09.23 UT 30.04.1985 г. наблюдалось сильное геомагнитное возмущение [223, Solar-Geophysical Data, 1985], которое может быть связано с приходом к Земле межпланетной ударной волны. Спутник *Прогноз-10-Интеркосмос* во время этого возмущения находился глубоко в магнитосфере на восходящей ветви второго витка. Первый кратковременный

выход спутника в солнечный ветер в 12.16 - 12.19 UT отличался необычным положением околоземной ударной волны, приблизившейся к Земле на расстояние  $\sim 9.3 R_E$  ( $X_{SE} = 4.99R_E, Y_{SE} = 4.83R_E, Z_{SE} = 6.20R_E$ , где  $R_E$  - радиус Земли). Это в  $\sim 1.6$  раза меньше среднего расстояния до ударной волны на вечернем фланге геомагнитосферы [5, Боярский и др., 1986]. Данные о состоянии межпланетной среды в период с 12 UT до 20 UT 30.04. представлены на Рис. 5.25 и 5.26: одномоментные средние значения потока и концентрации ионов, а также скорости и температуры протонов; пятиминутные значения температуры и скорости  $\alpha$ -частиц (см. Рис. 5.25), два угла и модуль магнитного поля (см. Рис. 5.26). Во время выхода спутника в солнечный ветер в 12.16-12.19 UT наблюдалось течение со скоростью протонов  $\sim 550$  км/с и  $\alpha$ -частиц  $\sim 520$  км/с, с кинетической температурой протонов  $\sim 10^5$  К и  $\alpha$ -частиц  $\sim 1.2 \cdot 10^5$  К, относительным содержанием  $\alpha$ -частиц  $\sim 4\%$ . Для этого периода характерна очень высокая концентрация ионов  $\sim 70$  см $^{-3}$ , что соответствует величине динамического давления  $\sim 3.5 \cdot 10^{-7}$  дин/см $^2$ , которая в  $\sim 20$  раз превышает его среднее значение на орбите Земли.

Околоземная ударная волна в 12.19 UT отходит от Земли, и после короткого пребывания спутника в солнечном ветре он  $\sim 4$  часа движется в переходной области. Второй кратковременный выход спутника в солнечный ветер в 16.12 - 16.21 UT произошел также на несколько более близком расстоянии от Земли, чем обычно,  $\sim 14.7R_E$  ( $X_{SE} = 6.3R_E, Y_{SE} = 9.7R_E, Z_{SE} = 9.0R_E$ ). В этот период был зарегистрирован с помощью энерго-масс-спектрометраДФП-М спектр с необычным ионным составом. Во время первого выхода спутника в солнечный ветер в период 12.16-12.19 UT была измерена только часть спектра, содержащая отдельные компоненты такие же, как для спектра, измеренного в период 13.12-16.21 UT. Сравнение этих данных для обоих периодов показывает, что параметры течения (по крайней мере, скорость и температура) существенно не изменились, при этом концентрация ионов уменьшилась в  $\sim 3$  раза.

В последующее время спутник несколько раз последовательно оказывался то в переходной области, то (кратковременно) в солнечном ветре, и только в  $\sim 19.05$  UT устойчиво вышел в солнечный ветер с несколько более низкими значениями гидродинамических параметров: скорость  $\sim 480$ -500 км/с, температура  $\sim 10^5$  К, концентрация  $\sim 15$  см $^{-3}$  и величина магнитного поля  $\sim 10$  нТ, при этом в течение  $\sim 2$ -3 часов указанные параметры сильно флуктуируют, а затем постепенно стабилизируются.

В период 16.13-16.21 UT 30 апреля 1985 г. был зарегистрирован спектр ионов солнечного ветра, представленный на Рис. 5.27. Кружками на этом рисунке показаны результаты измерения, при этом сплошными линиями соединены экспериментальные точки, относящиеся к измерениям с фиксированными значениями  $M/q$  (показаны на рисунке). Стрелками на рисунке отмечено ожидаемое положение пиков ионов  $He^{+2}, O^{+7}, O^{+6}, Si^{+10} - Si^{+8}, S^{+11} - S^{+9}, Fe^{+16}, Fe^{+15}$  в предположении потоковой скорости  $\sim 513$  км/с и  $Fe^{+14} - Fe^{+10}$  при потоковой скорости  $\sim 502$  км/с. Штриховыми линиями показаны

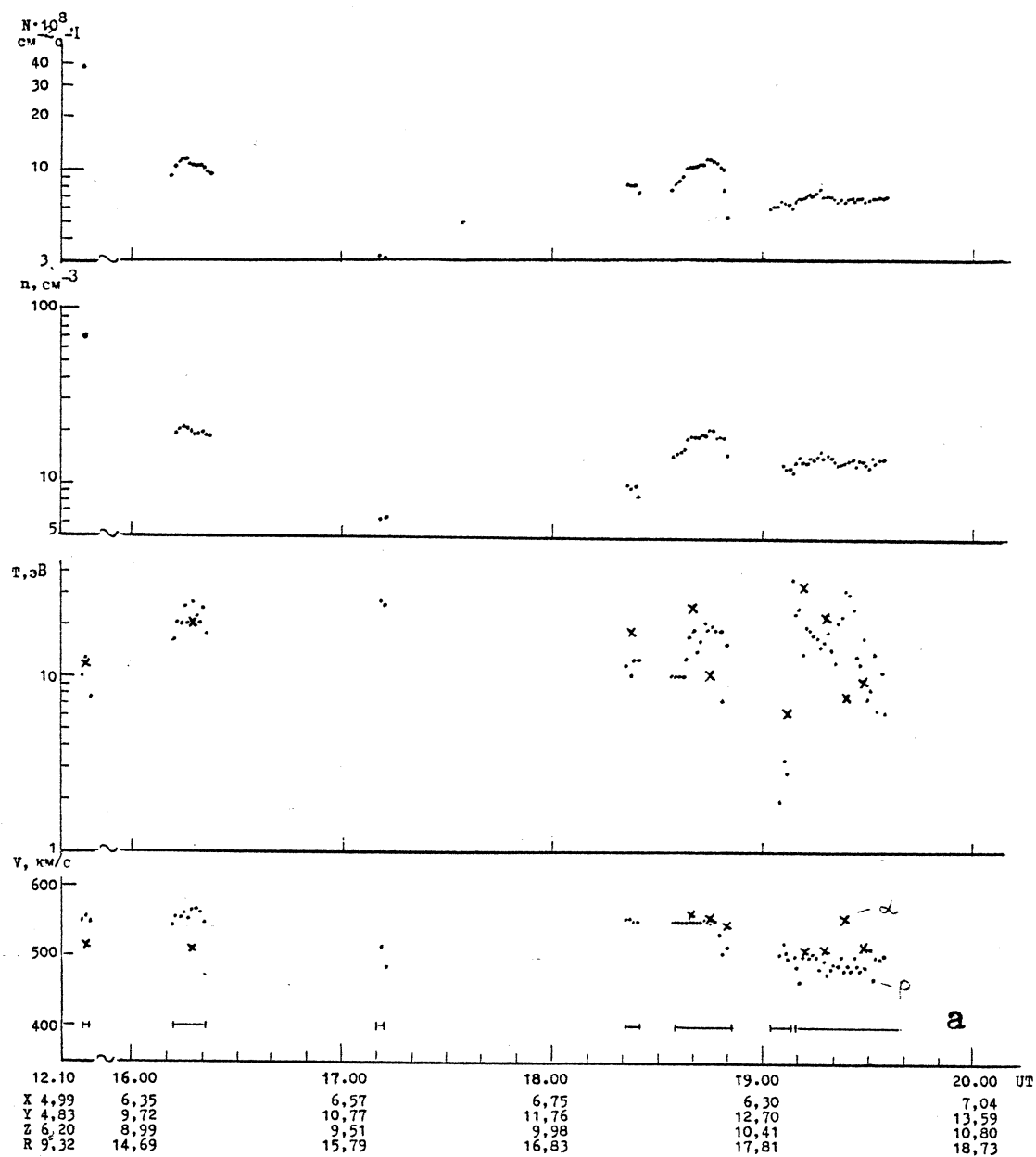


Рис. 5.25: Динамика гидродинамических параметров (величины потока, концентрации, температуры и скорости  $\alpha$ -частиц (крестики) и протонов (точки)) по данным спутника *Прогноз-10-Интеркосмос* 30 апреля 1985 г.

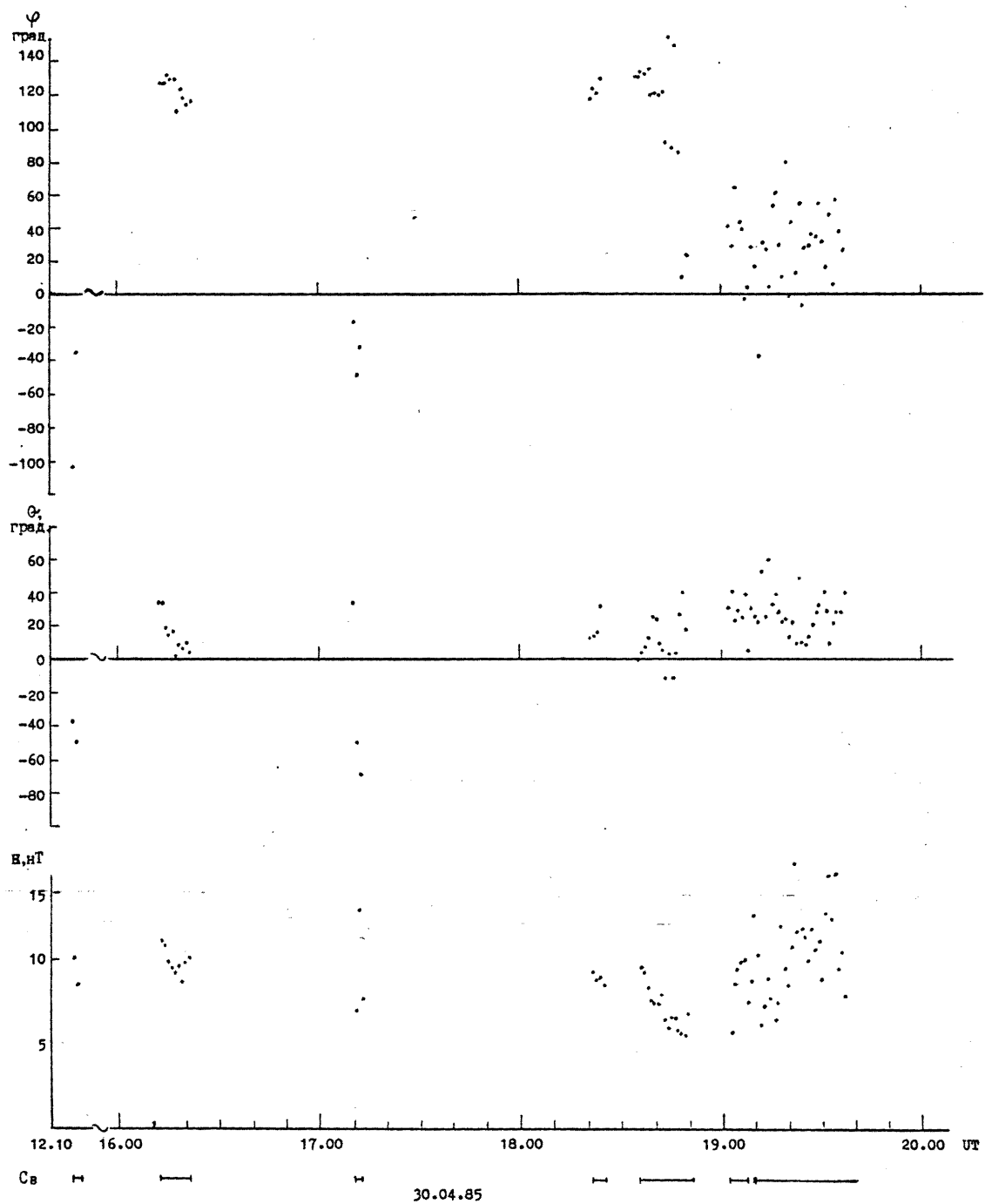


Рис. 5.26: Динамика магнитного поля (модуль и углы) по данным спутника *Прогноз-10-Интеркосмос* 30 апреля 1985 г. Сплошной линией внизу указаны интервалы пребывания спутника в солнечном ветре.

результаты аппроксимации данных измерений модельными спектрами. Все пики на спектре хорошо объясняются обычно наблюдаемыми в солнечном ветре ионами (в предположении, что все ионы имеют близкие кинетические температуры  $\sim 5 \cdot 10^4 \text{K}$ ) за исключением широкого пика при  $M/q \sim 4$ .

Объяснение наличия на Рис. 5.27 широкого пика при  $M/q \sim 4$  регистрацией ионов  $Si^{+7}, S^{+8}$  и/или  $Fe^{+14}$  затруднено по следующим причинам. Во-первых, оценка ионизационных температур по соотношению пиков кислорода  $O^{+7}/O^{+6}$  и железа  $Fe^{+12} - Fe^{+10}$  дает, соответственно, величины  $\sim 2.4 \cdot 10^6 \text{K}$  и  $\sim 1.9 \cdot 10^6 \text{K}$ . При таких температурах солнечной короны в состояниях  $Si^{+7}, S^{+8}$  и  $Fe^{+14}$  находится незначительная часть (менее 10%) этих элементов [150, Jordan, 1969]. Поэтому они не могут обеспечить наблюдаемого потока с  $M/q \sim 4$ . Во-вторых, как отмечалось выше, наилучшая аппроксимация результатов измерений достигается при равенстве кинетических температур ионов кислорода и железа. Однако, предполагая равенство кинетических температур ионов кислорода, железа и ионов  $Si^{+7}, S^{+8}$  и  $Fe^{+14}$ , невозможно получить такой же широкий пик, какой был зарегистрирован при  $M/q \sim 4$ . Поэтому пик при  $M/q \sim 4$  интерпретирован как поток ионов  $He^+$  с кинетической температурой  $\sim 2 \cdot 10^5 \text{K}$  и относительным содержанием  $He^+/He^{++} \sim 10^{-3}$ .

При отмеченных выше предположениях, а также с учетом энерго-угловой характеристики и массовой селекции прибора ДФП-М был получен спектр (в шкале  $E/q$ ) падающего на входное окно спектрометра потока ионов солнечного ветра. Этот спектр представлен на Рис. 5.28. В расчетах учитывались только наиболее распространенные элементы за исключением углерода и азота, зарядовые состояния которых не удалось достоверно идентифицировать из-за маскирующего влияния больших потоков ионов  $He^{++}$  и  $O^{+7}$ . Относительное содержание элементов  $Si/S$  принято равным 3, так как прибор не мог их достоверно разделить из-за близких значений  $M/q$ . Оценки содержания и ионизационных температур для ряда химических элементов в период наблюдения приведены в Табл. 5.8. Содержание кислорода, кремния и железа близко к ранее полученным оценкам их содержания в солнечном ветре, в то время как содержание гелия оказывается несколько выше (см. Таблицы 1.3 и 5.6). Полученные оценки ионизационной температуры ионов кислорода, кремния и железа оказываются также несколько выше, чем полученные ранее по измерениям обычных спектров ионов солнечного ветра [72, 75, Vame et al., 1974; Vame et al., 1979] (см. также Таблицу 5.7). Относительное содержание ионов  $He^+/He^{++} = (1.0 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$  оказывается на  $\sim 3$  порядка выше, чем рассчитанное при ионизационной температуре  $\sim 10^6 \text{K}$  [153, Kozlovsky, 1968], указывая на более низкую ионизационную температуру ( $\sim 10^3 - 10^4 \text{K}$ ).

Ионы  $He^+$  впервые наблюдались методом энерго-анализа на спутниках серии *Vela*, и их содержание составило  $He^+/He^{++} \sim 10^{-3}$  [69, Vame et al., 1968]. Позже на космических аппаратах *IMP 7, 8*, *Helios 1, 2* и *ISEE 1, 3* также наблюдались отдельные события, во время которых регистрировались ионы  $He^+$ , причем в ряде случаев их содержание относительно ионов



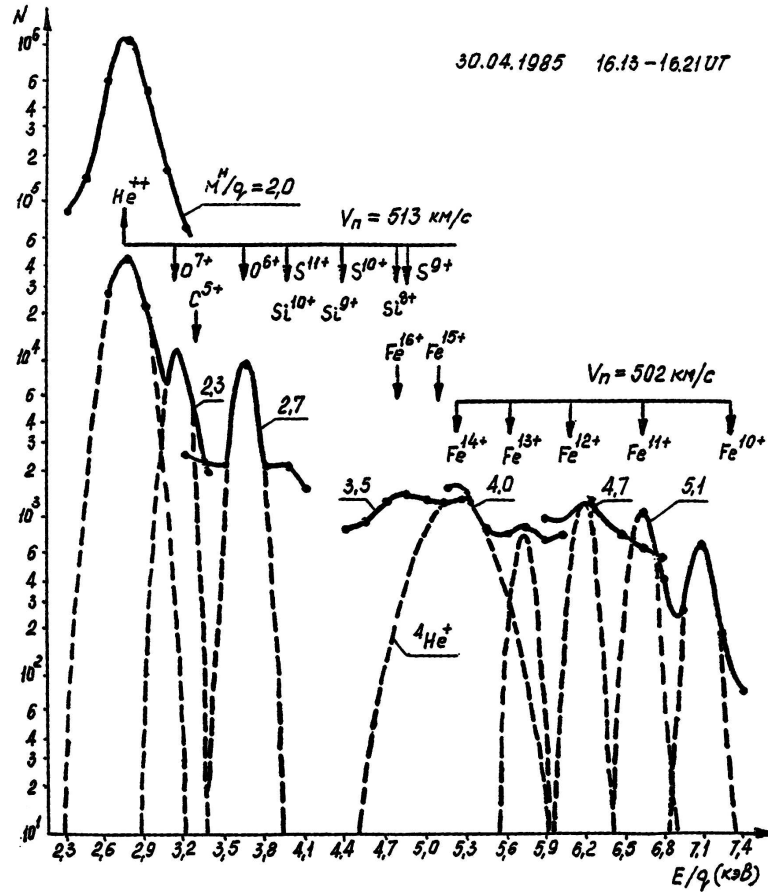


Рис. 5.27: Энергетический спектр ионов солнечного ветра, измеренный 30 апреля 1985 г. в период 16.13-16.21 UT с помощью масс-спектрометра ДФП-М комплекса БИФРАМ на спутнике Прогноз-10-Интеркосмос [33, Ермолаев и др., 1989]. Результаты измерений (точки), относящиеся к измерениям с фиксированным значением  $M/q$ , соединены сплошными линиями. Пунктирные линии представляют результаты аппроксимации результатов измерений.

Таблица 5.8: Ионный состав и ионизационные температуры потока солнечного ветра 30 апреля 1985 г. в 16.13-16.21 UT

Элемент	Концентрация $\text{см}^{-3}$	Ионизационная температура $10^6 \text{ K}$	Содержание относительно водорода
Водород	$19 \pm 2$	—	1
Гелий ( $\text{He}^{++}$ )	$1,4 \pm 0,4$	—	$(7 \pm 2) \cdot 10^{-2}$
Кислород	$(9 \pm 3) \cdot 10^{-3}$	$2,4 \pm 0,4$	$(4,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-4}$
Кремний	$(7 \pm 3) \cdot 10^{-4}$	$2,0 \pm 0,2$	$(3,7 \pm 1,6) \cdot 10^{-5}$
Железо	$(6 \pm 2) \cdot 10^{-4}$	$1,8 \pm 0,1$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-5}$

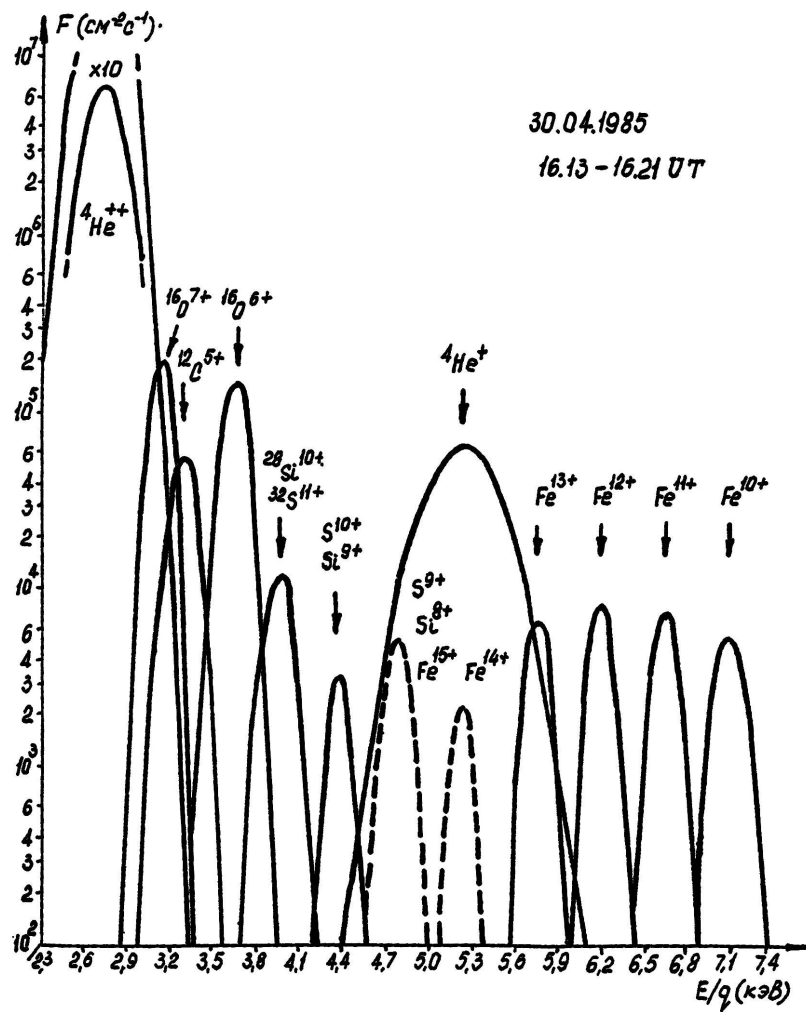


Рис. 5.28: Модельный энергетический спектр ионов солнечного ветра, полученный по данным Рис. 5.27.

$He^{++}$  достигало величины  $\sim 0.3$  [126, 216, 263, Gosling et al., 1980; Schwenn et al., 1980; Zwickl et al., 1982]. В большинстве этих событий ионы  $He^+$  наблюдались в холодной плотной плазме, регистрирующейся через несколько часов после прохождения фронта межпланетной ударной волны (в "поршне"). Лишь одно событие было связано с потоком типа NCDE. В этих работах выдвигается гипотеза, что наблюдаемый эффект связан с тем, что приборы регистрировали плазму холодной хромосферы Солнца, которая, экранированная магнитным полем, пересекла горячую корону во время солнечной вспышки, не изменив при этом ионизационных состояний ряда ионов. Тот факт, что на массовом спектре присутствуют пики и других ионов, наблюдаемые в обычном солнечном ветре, объясняется тем, что уже после "замораживания" ионов произошло перемешивание хромосферной и корональной плазмы. Несколько случаев наблюдения ионов  $He^+$  отмечались по результатам масс-спектрометрических измерений (массовое разрешение было сравнительно невысоким  $(M/q)/\Delta(M/q) \sim 2$ ) с помощью прибора ПРОМИКС на спутнике *Прогноз 8* [202, Pissarenko et al., 1985].

В целом результаты измерения на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос* ионного состава солнечного ветра в период регистрации высокого содержания ионов  $He^+$  согласуются с результатами других измерений ионов  $He^+$ , описанных выше. Однако имеется определенное отличие. Содержание относительно водорода, кислорода, кремния и железа по нашим данным оказалось близким (или немного меньше) к средним значениям этих параметров в солнечном ветре (см. Табл. 1.3 и 5.6), в то время как по данным спутников *IMP 7,8* и *ISEE 1, 3* [263, Zwickl et al., 1982] было обнаружено, что содержание этих элементов относительно водорода значительно превышало средние значения для солнечного ветра, а относительно гелия оно оказалось близким к среднему значению.

Для определения происхождения течения солнечного ветра, содержащего ионы  $He^+$ , рассмотрим имеющиеся данные об условиях на Солнце и в межпланетной среде в течение периодов времени близких к интервалу наблюдения. В предшествующий период наблюдалось всего две солнечные вспышки, которые могли вызвать возмущение около Земли в период близкий к рассматриваемому событию: 24.04.1985 г. в 09.14 UT балла 2В (XI.9) в области с координатами N06, E27 и 25.04.1985 г. в 19.06 UT балла 1В (CI.9) в той же области N06, E03 [227, 226, Solar-Geophysical Data, 1985b; Solar-Geophysical Data, 1985c]. С первой вспышкой, по-видимому, связан приход к Земле интенсивного потока энергичных протонов (начало 24.04 в  $\sim 14.30$  UT и максимум 26.04 в  $\sim 06.00$  UT) [225, Solar-Geophysical Data, 1985d] и межпланетной ударной волны, которая по результатам плазменных наблюдений на спутнике *IMP 8* (любезно предоставленных др. Х.Бриджем) проявилась в виде возрастания скорости течения от  $\sim 520$  до  $\sim 670$  км/с, концентрации от  $\sim 5$  до  $\sim 16$  см $^{-3}$ , температуры  $\sim 10^5$  до  $\sim 3 \cdot 10^5$  К, наблюдавшегося в  $\sim 04.00$  UT 26.04. Другое более слабое возмущение наблюдалось в  $\sim 22.00$  UT

27.04. Запаздывание возмущений у Земли относительно всплесков соответствуют типичным скоростям распространения межпланетных ударных волн  $\sim 950$  и  $\sim 820$  км/с, соответственно. Далее в течение 28-29.04.1985 г. регистрировалось течение солнечного ветра с постепенно спадающей скоростью (до  $\sim 430$  км/с к 30.04), концентрацией  $\sim 5$  см $^{-3}$  и температурой  $\sim 2 \cdot 10^5$  К. Данные для 30.04.1985 г., полученные на спутнике *Прогноз-10-Интеркосмос*, представлены на Рис. 5.25 и 5.26

Как уже отмечалось выше, по геомагнитным данным в 09.23 UT 30.04 наблюдалось сильное геомагнитное возмущение [223, Solar-Geophysical Data, 1985], которое может быть связано с приходом межпланетной ударной волны. В предшествующие четверо суток не было зарегистрировано ни одной солнечной вспышки достаточно сильной, чтобы вызвать такую ударную волну. В то же время 26.04 в 23-24 UT и 29.04 в 10.00-10.30 UT были зарегистрированы выбросы корональной массы [224, Solar-Geophysical Data, 1985e]. Для первого из них получается достаточно реальное значение средней скорости распространения до Земли несильной ударной волны  $\sim 510$  км/с. Во время короткого выхода спутника в солнечный ветер в 12.16 - 12.19 UT наблюдалось течение со скоростью протонов  $\sim 550$  км/с и  $\alpha$ -частиц  $\sim 520$  км/с, которые несколько выше средней скорости распространения ударной волны, и очень высокой концентрацией  $\sim 70$  см $^{-3}$  (см. Рис. 5.25 и 5.26).

Сравнительно низкие значения магнитного поля  $\sim 10$  нТ и температуры  $T_p \sim 10^5$  К при высокой скорости и концентрации потока позволяют предположить, что в рассматриваемый период наблюдалась не сжатая за фронтом ударной волны плазма, в которой возрастания магнитного поля и температуры примерно пропорциональны возрастанию концентрации, а скорее уплотнение на границе "поршня" связанного, возможно, с упомянутым выше выбросом корональной массы. Эта интерпретация может быть подвергнута сомнению, так как в среднем временной интервал между межпланетной ударной волной и "поршнем" по результатам [128, Gosling et al., 1987] составляет 12 часов (с довольно большим разбросом от  $\sim 2$  часов до  $\geq 1$  суток), что близко к нашим результатам (от 1 до 17 часов со средней величиной около 8 часов), представленным в Табл. 6.3, а в данном случае между геомагнитным возмущением ( $\sim 09.23$  UT) и "поршнем" ( $\sim 12.16$  UT) - всего  $\sim 3$  часа. Кроме того скорость потока  $\sim 550$  км/с несколько выше средней скорости движения "поршня" от Солнца до Земли  $\sim 510$  км/с. Трудности такой интерпретации рассматриваемого события не возникают, если геомагнитное возмущение в 09.23 UT 30.04 было обусловлено другими причинами, а рассматриваемый выброс корональной массы сопровождался слабой ударной волной, которая не была зарегистрирована у Земли. В пользу гипотезы о связи наблюдаемого события с выбросом корональной массы свидетельствует тот факт, что во время этого события относительное содержание гелия достигает достаточно высокой величины  $(7 \pm 2)\%$ .

Таким образом, приведенное описание данных о состоянии Солнца и

межпланетной среды вблизи рассматриваемого события не дает однозначного ответа на вопрос о происхождении течения с аномальным ионным составом, наблюдавшегося 30.04.1985 в 16.13-16.21 UT. Наиболее вероятно, что это событие связано с выбросом корональной массы, произошедшим 24.04.1985 г. в 23-24 UT.

## 5.4 Выводы

Представленные в данной главе данные, полученные как методом энерго-анализа, так и методом энерго-масс-анализа на спутниках *Прогноз 7*, *8* и *Прогноз-10-Интеркосмос*, были разделены на разные типы течений солнечного ветра, которые связаны со структурой и динамикой солнечной короны, и это позволяет сделать выводы как о некоторых различиях в физических процессах с солнечным ветре, так и в солнечной короне. В частности, могут быть сделаны заключения по трем группам исследованных проблем: 1) различия потоков массы, импульса и энергии в разных типах течений солнечного ветра, 2) зависимость сравнительного поведения протонов и  $\alpha$ -частиц от типа течений солнечного ветра и 3) поведение химического состава и ионизационной температуры в относительно медленных типах течений солнечного ветра.

По первой группе вопросов получены следующие основные результаты:

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> 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> в CIR.
2. Учитывая длительность и частоту появления разных типов течений, измерения показывают, что солнечные потери массы почти равны в разных стационарных потоках и в  $\sim 5$  раз выше, чем в возмущенных типах течений.
3. 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> в MC,  $3,7 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup> в CIR и  $6,3 \cdot 10^{-8}$  дин/см<sup>2</sup> в HCS.
4. 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 течениях из корональных стримеров.

5. Наибольшие отношения теплового давления к магнитному  $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$  наблюдаются в HCS ( $\sim 2$ ) и CIR ( $\sim 1$ ), а наименьшие отношения – в MC ( $\sim 0,3$ ). В других типах течений параметр  $\beta$  составляет около 0,5.
6. 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 типов течений.
7. Частота появления в геомагнитосфере SSC возмущений во время возмущенных типов течений солнечного ветра ( $\sim 3 - 5$  событий/день) в  $\sim 50$  раз выше, чем во время стационарных течений ( $\sim 0,1$  событий/день).

По сравнению поведения протонов и  $\alpha$ -частиц в течениях разного типа солнечного ветра 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.
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.

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 энерго-анализа малые ионные составляющие, такие условия выполняются в течениях типа INS(CS), NCDE(HCS) и HAE(CH) 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. Внутри рассматриваемых интервалов не удается обнаружить однозначной корреляции между изменениями потоков тяжелых ионов и изменениями гидродинамических параметров солнечного ветра. Если такая корреляция и существует, то она маскируется случайными изменениями и неопределенностью экспериментальных оценок.
6. На временных масштабах  $\sim 1$  суток содержание ионов гелия, кислорода, кремния и железа относительно водорода уменьшается с ростом полной концентрации (или величины потока) ионов солнечного ветра и изменяется пропорционально для всех малых ионных составляющих. Такое поведение содержания, во-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.

7. Событие типа НАЕ (с высоким содержанием малых ионных составляющих) может быть вызвано истечением плазмы из глубоких слоев солнечной короны в области с открытой конфигурацией магнитного поля (корональной дыры) или образованием внутри стримера замкнутой плазменной структуры при пересоединении силовых линий магнитного поля.
8. 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.
9. 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 течение солнечного ветра с высокой концентрацией ионов ( $\sim 70$  см $^{-3}$ ).



## Глава 6

# Роль крупномасштабной структуры солнечного ветра в солнечно-земной физике

В предыдущих главах подробно изучались явления в солнечном ветре и сопоставлялись с явлениями в солнечной короне. В этой главе мы проанализируем данные с позиции программы "Космическая погода", т.е. включим в рассмотрение данные о геомагнитных возмущениях и их связи с явлениями на Солнце и в межпланетной среде. С этой целью мы воспользуемся не только данными, полученными в ходе описанных выше экспериментов, но и данными солнечных, межпланетных и наземных измерений за 25-летний период с 1976 по 2000 гг. и исследуем геоэффективность солнечных и межпланетных явлений, т.е. их способность возбуждать на Земле магнитные бури и суббури.

### 6.1 Описание данных и общая характеристика периода

Для анализа мы взяли данные, доступные через сеть Интернет: два списка сильных солнечных вспышек: (1) класса (в рентгеновском диапазоне) от M0 и выше, но только такие, которые сопровождались повышением потоков солнечных космических лучей (СКЛ) на спутниках *GOES* (<http://sec.noaa.gov/ftplib/indices/SPE.txt>) и (2) все вспышки класса от M5 и выше ([ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR\\_DATA/SOLAR\\_FLARES/XRAY\\_FLARES](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_FLARES/XRAY_FLARES)), параметры плазмы солнечного ветра (скорость, температура и концентрация ионов) и модуль и три компоненты ММП (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/>), среднечасовые значения нескорректированного  $D_{st}$  индекса (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/> и <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>) в интервале 1976 - 2000 годов. Включение в анализ двух наборов солнечных вспышек обусловлено тем, что в 1-м случае мы анализировали вспышки, начиная с более слабых

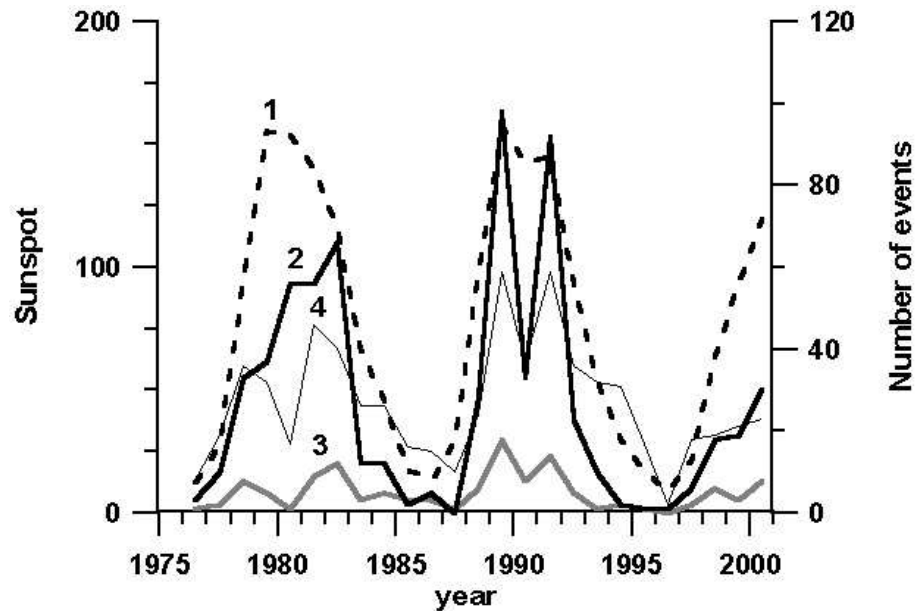


Рис. 6.1: Временные вариации среднегодовых значений числа солнечных пятен (кривая 1, шкала слева), числа сильных (класса выше M5) солнечных вспышек (кривая 2, шкала справа), числа сильных вспышек с возрастанием СКЛ (класса выше M0) (кривая 3, шкала справа) и числа сильных магнитных бурь со значениями  $D_{st}$  индекса в минимуме менее -60 нТ (кривая 4, шкала справа).

(класса M0 по сравнению с M5 во 2-м наборе) вспышек, но зато таких вспышек, которые проявили себя в СКЛ у орбиты Земли, а во 2-м случае мы взяли полный набор сильных вспышек без какой-либо предварительной селекции данных. Анализ данных 1-го набора солнечных вспышек описан в работах [27, 248, Ермолаев и Ермолаев, 2002; Yermolaev and Yermolaev, 2002]. Статистика в обоих случаях была достаточно большой и составляла 126 и 653 вспышек, соответственно. Для ряда событий мы использовали также полярные индексы *Contracted Oval*, *Standard Oval* и *Expanded Oval* (<http://www.wdc.rl.ac.uk/gbdc/ovals/plots/>). Необходимо отметить, что если измерения рентгеновского излучения короны Солнца и земного  $D_{st}$  индекса покрывают практически 100% интервала, то данные по межпланетной среде до запуска космических аппаратов *Wind* (1994 г.) и *ACE* (1997 г.) имеют значительные пропуски, а временное разрешение ранних данных составляло всего 1 час. Что касается данных по выбросам корональной массы (coronal mass ejection - CME), то систематические каталоги CME имеются для данных спутника *SOHO* только с 1996 г. ([http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)), и поэтому мы были вынуждены ограничиться лишь 5-летним (1996-2000) интервалом наблюдений на спутнике *SOHO*, а также обсуждением ранее опубликованных результатов по наблюдениям CME.

Общее состояние рассматриваемого 25-летнего периода можно охарактеризовать Рис. 6.1, на котором пунктирной линией (кривая 1) показано среднегодовое число солнечных пятен, толстыми черной и серой линиями (2 и 3) - число

сильных солнечных вспышек балла не ниже М5 и не ниже М0 с возрастанием СКЛ и тонкой линией (3) - число сильных магнитных бурь (см. определение ниже). Период начинается с минимума в 1976 г., далее идут два полных цикла солнечной активности, и в 1996 г. начинается 23-й цикл, который в 2000 г. достиг своего максимума. Числа сильных вспышек и сильных бурь достигают максимумов в годы максимумов солнечной активности. Обращает на себя внимание очень похожая форма кривых 2, 3 и 4 (коэффициенты корреляции для пар кривых 2-4 и 3-4 составляют  $\sim 0.8$  и  $\sim 0.9$ , соответственно), что указывает на то, что вариации чисел вспышек и магнитных бурь могут иметь одну общую причину. Однако, как мы покажем ниже, магнитные бури оказываются практически не связанными с солнечными вспышками.

## 6.2 Состояние магнитосферы

В качестве индикатора геомагнитной активности мы взяли измерения  $D_{st}$  индекса (см. сплошную линию на Рис. 6.2), который в основном связан с геомагнитным полем вблизи экватора и состоянием кольцевого тока и хорошо описывает развитие глобальных крупномасштабных возмущений магнитосферы - магнитных бурь [62, 208, 210, 200, Akasofu, 1964; Rostoker and Falthammar, 1967; Russell et al., 1974; Perreault and Akasofu, 1978]. Мы используем первичные данные по  $D_{st}$  индексу без учета вклада в величину  $D_{st}$  индекса токов на поверхности магнитопаузы. В спокойное время  $D_{st}$  индекс варьирует вблизи нуля, слабо изменяясь в диапазоне от -30 до +30 нТ. Магнитная буря обычно сопровождается резким (за 1-10 часов) провалом  $D_{st}$  индекса до некоторого минимального значения и медленным (1-3 суток) восстановлением величин  $D_{st}$  индекса до первоначального состояния вблизи нуля.

Для описания возмущенности полярной области используются или магнитометрические записи конкретных полярных станций, вблизи которых происходило то или иное событие, или интегральные индексы и в частности индексы *Contracted Oval*, *Standard Oval* и *Expanded Oval*, вычисляемые для трех систем станций, расположенных на трех концентрических окружностях вблизи северного магнитного полюса. Анализ дополнительных данных показывает, что эти индексы чувствительны к суббурям и позволяют их обнаруживать, однако в небольшом числе случаев эти индексы показывают активации, которые не являются суббурями. В нашем анализе мы будем все эти явления называть "активациями", понимая, что примерно 2/3 случаев относятся к суббурям. Так как полярные явления имеют характерные времена порядка нескольких десятков минут, т.е. заметно меньше крупномасштабных явлений в солнечном ветре, то для сопоставления с межпланетными явлениями нам не столько важен вид полярного возмущения, сколько их число за время межпланетного возмущения. Поэтому мы использовали следующий алгоритм: если хотя бы по

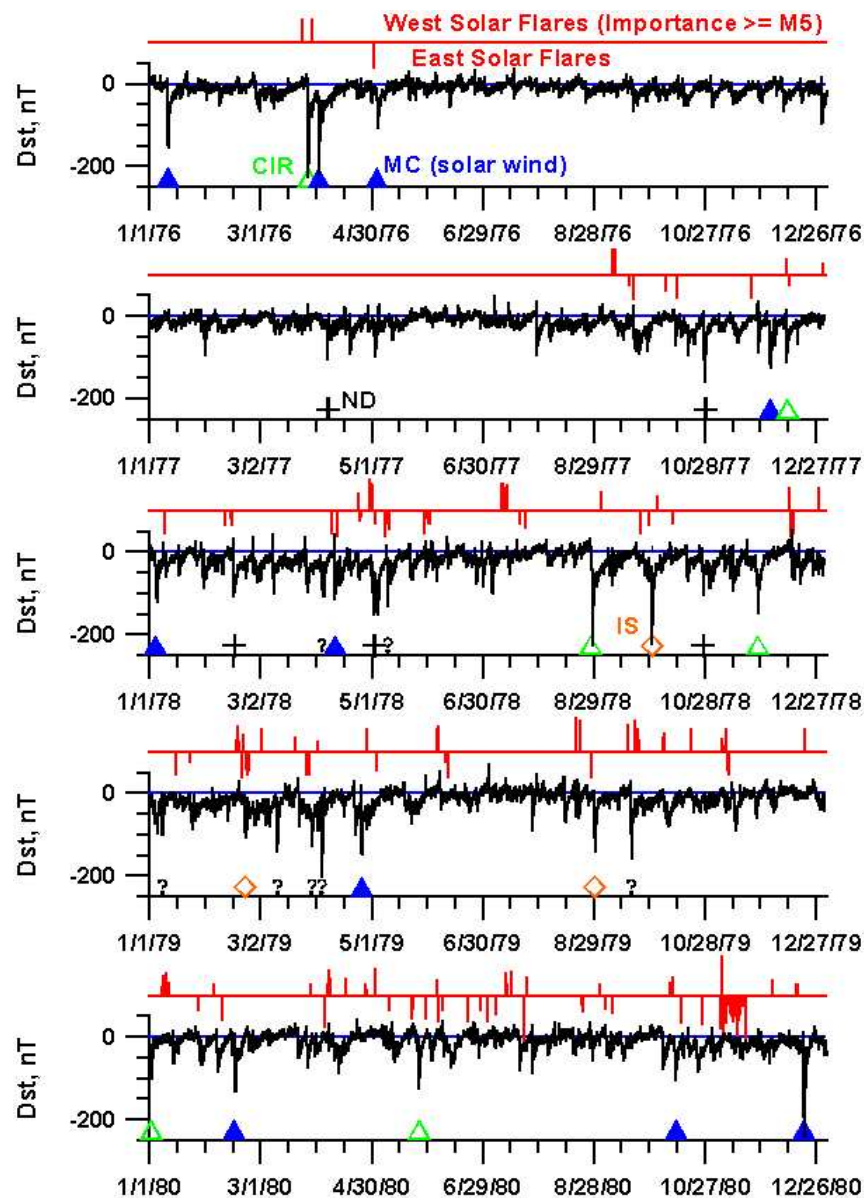


Рис. 6.2: Верхние части панелей: вертикальные отрезки вверх и вниз относительно горизонтальной линии - сильные солнечные вспышки на западных (вверх) и восточных (вниз) частях солнечного диска. Средние части панелей: временной ход  $D_{st}$  индекса. Нижние части панелей: явления в межпланетном пространстве (темные треугольники - MC, светлые треугольники - CIR, ромбики - IS, вопросительный знак - неопределенный тип события, крестик - нет данных).

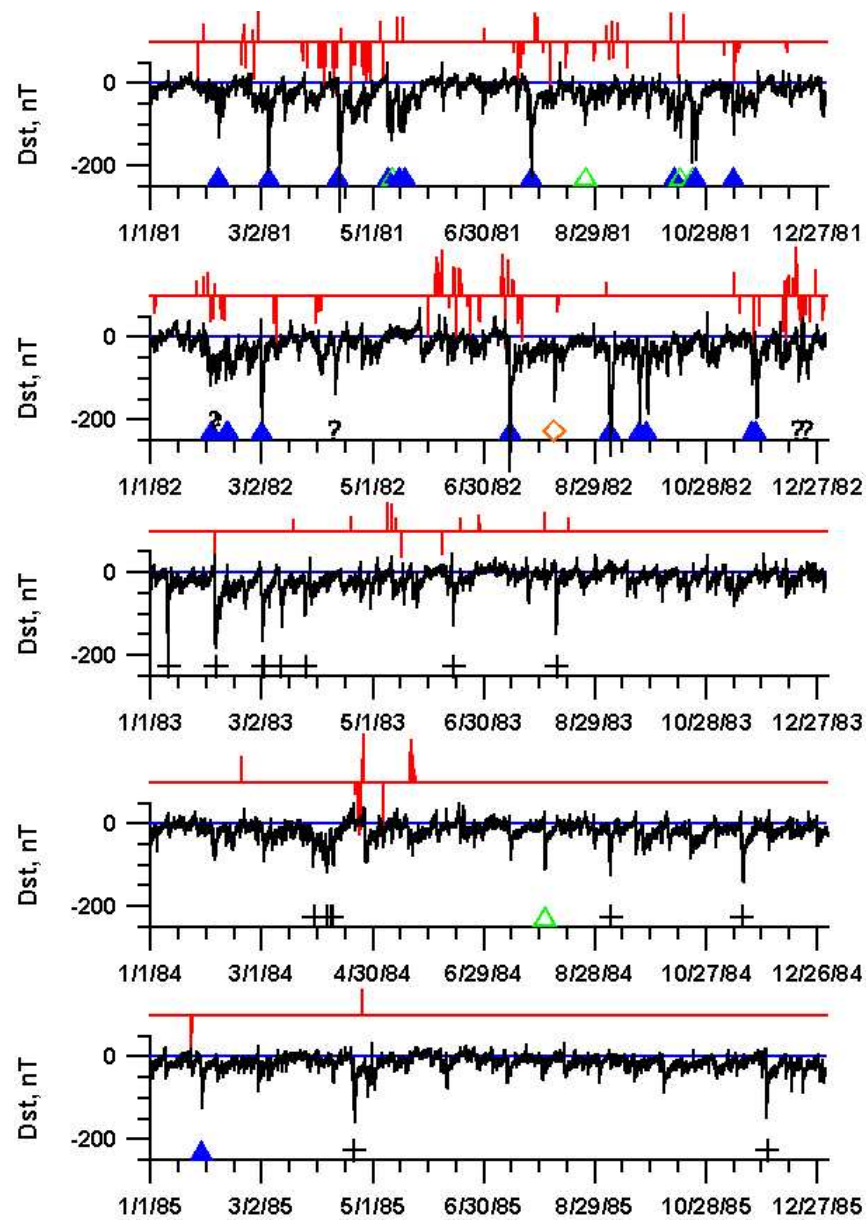


Рис. 6.3: Продолжение Рис. 6.2 для 1981-1985 годов.

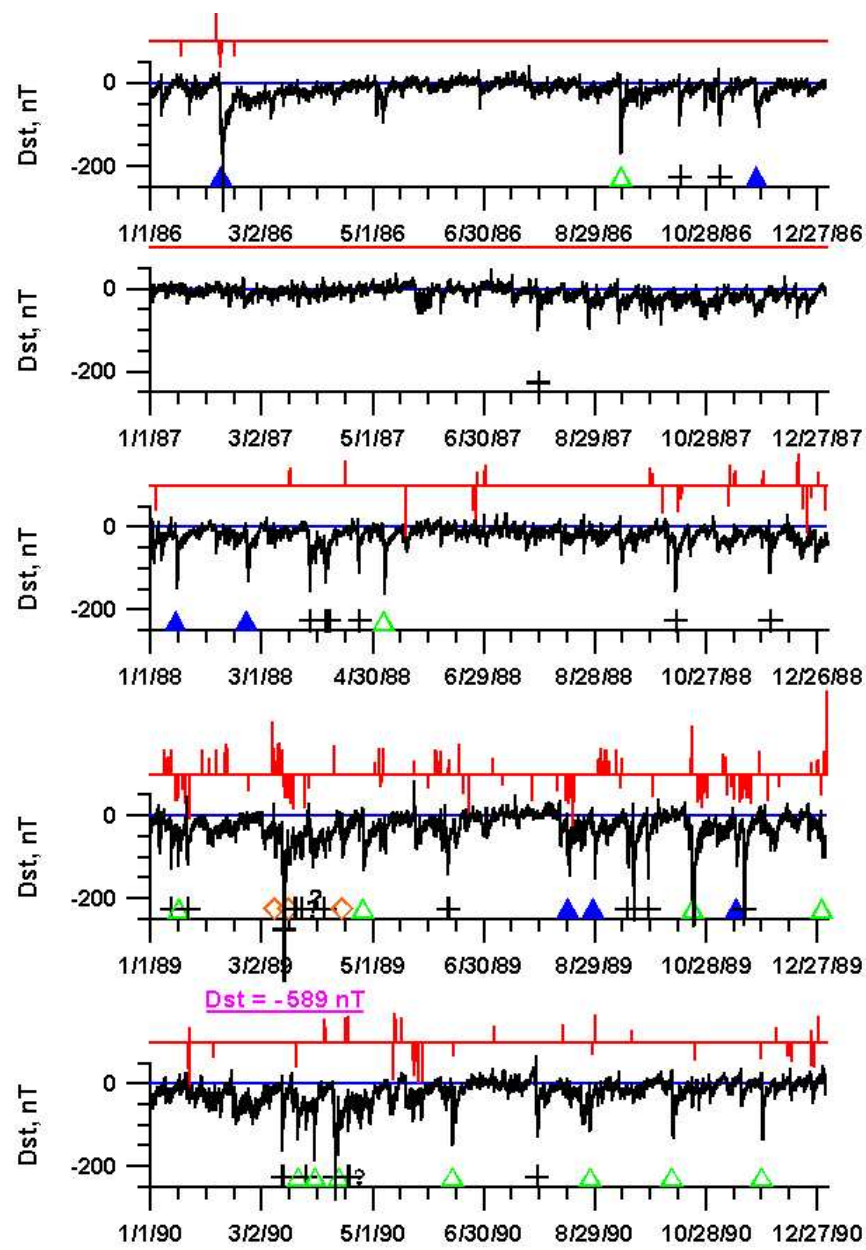


Рис. 6.4: Продолжение Рис. 6.2 для 1986-1990 годов.

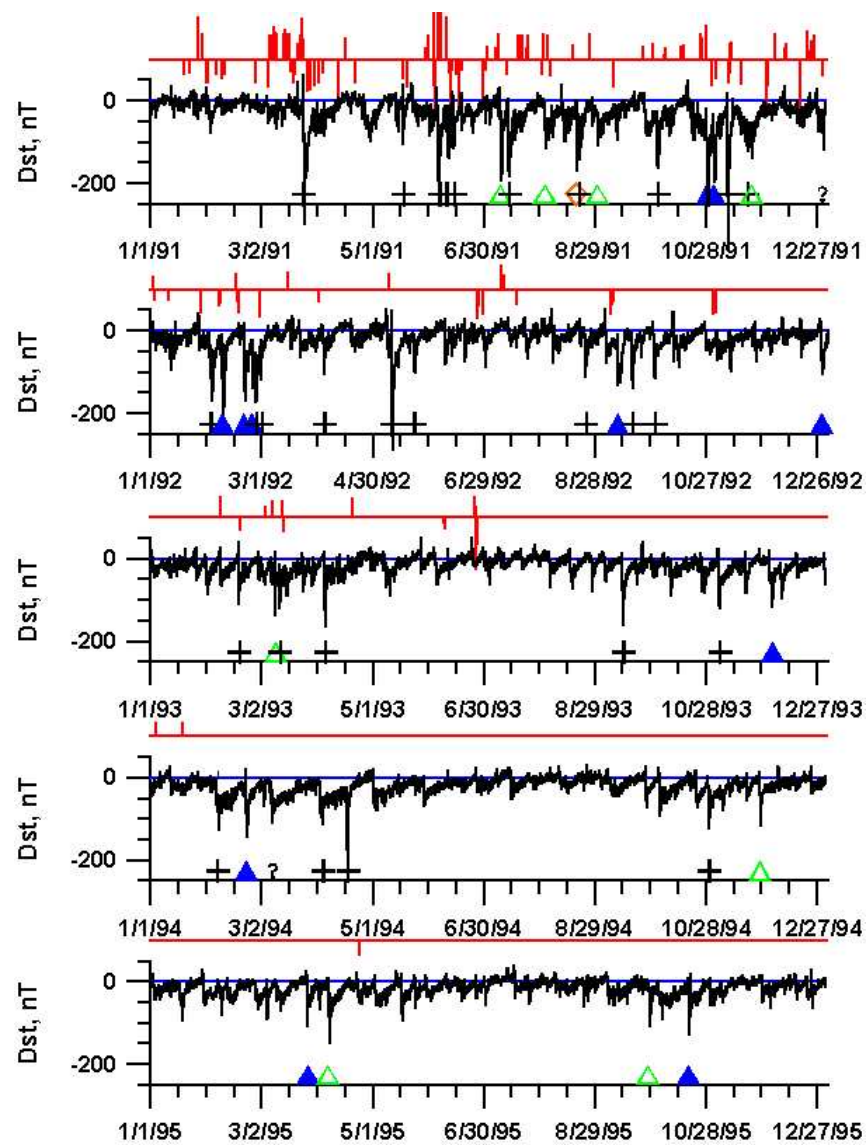


Рис. 6.5: Продолжение Рис. 6.2 для 1991-1995 годов.



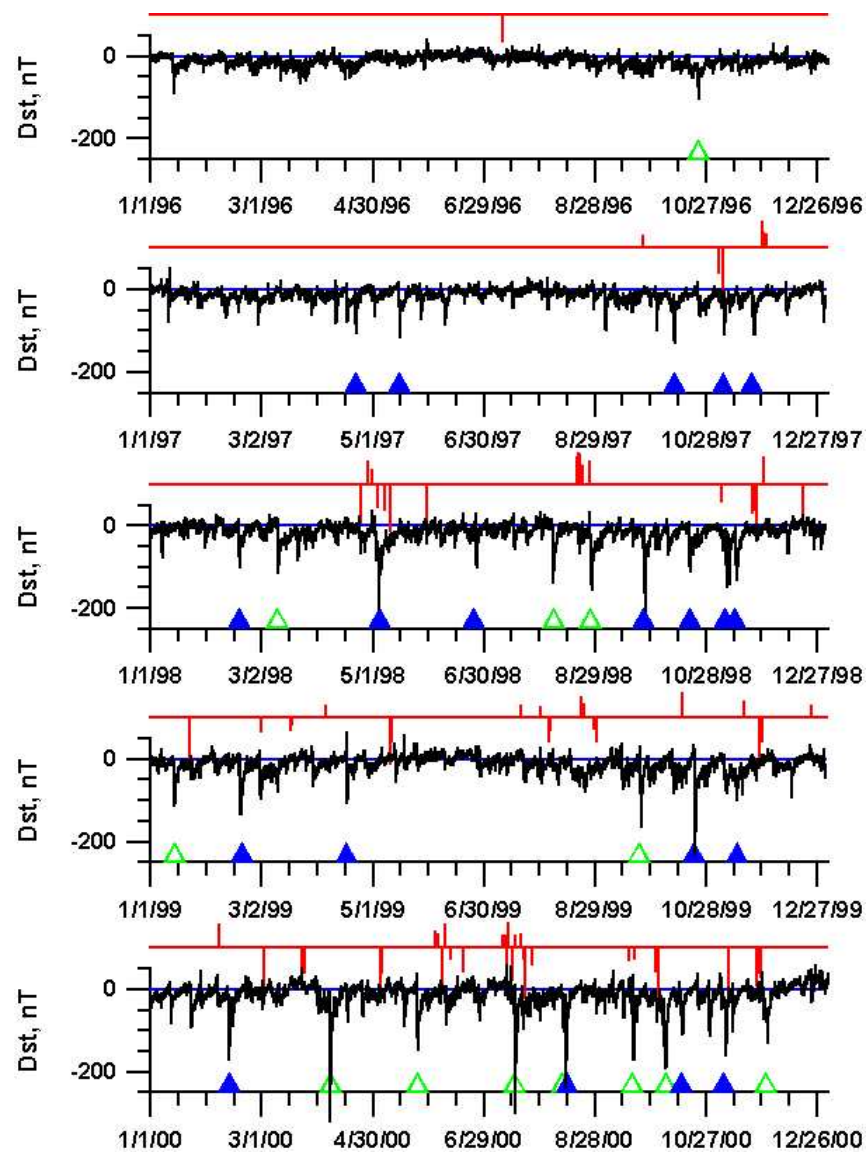


Рис. 6.6: Продолжение Рис. 6.2 для 1996-2000 годов.



одному из 3 индексов на интервале 15 минут происходит падение относительно предыдущего уровня на величину не менее 200 нТ и сохраняется по крайней мере в течение 10 минут, то такое явление мы выделяем как полярную активацию.

На Рис. 6.7 показаны распределения среднечасовых значений  $D_{st}$  индекса за весь период 1976-2000 годов (толстая линия, шкала справа), а также для возмущенного 1989 г. (тонкая сплошная линия) и спокойного 1976 г. (штриховая линия). Шкалы подобраны таким образом, что все 3 распределения имеют приблизительно одинаковую площадь. Все распределения имеют колоколообразную часть в диапазоне значений от -30 до +20 нТ, на которую приходится подавляющая часть значений. Однако на всех распределениях (и особенно для возмущенного года) имеются "хвосты" в области отрицательных значений  $D_{st}$  индекса. Провалы меньше -30 нТ обычно называют магнитными бурями. Хотя в литературе нет устоявшихся методики и терминологии для классификации магнитных бурь на основе  $D_{st}$  индекса (для такой классификации обычно используется  $K_p$  индекс), мы будем придерживаться достаточно часто применяемой градации и считать бури с  $D_{st}$  от -30 до -60 нТ "слабыми", от -60 до -100 нТ "средними" и менее -100 нТ "сильными". Слабых бурь слишком много, чтобы они могли рассматриваться изолированными друг от друга: они не только могут располагаться во времени близко друг к другу, но и перекрываться. Это сильно усложняет (а в ряде случаев делает невозможным) анализ по их сопоставлению с явлениями на Солнце, так время распространения СВ от Солнца до Земли составляет от 2 до 4 суток. Поэтому мы исключили из анализа слабые бури и ограничились лишь средними и сильными бурями, полное число которых составило 618: средних 414 и сильных 204. Таким образом, в среднем за весь 25-летний период сильная или средняя магнитная буря наблюдается 1 раз в  $\sim 15$  суток. В спокойные годы этот период может возрасти до  $\sim 45$  суток, а в возмущенные – уменьшиться до  $\sim 6.8$  суток. Сильнейшая за 25-летний период магнитная буря наблюдалась 14 марта 1989 г., и в пике  $D_{st}$  индекс составил -589 нТ (на Рис. 6.4 мы для этой бури ограничили значения на уровне -300 нТ).

Помимо вариаций в цикле солнечной активности (см. Рис. 6.1) число бурь варьирует и в течение года. Методом наложения эпох была определена зависимость числа сильных магнитных бурь (штриховая линия 3) от месяца, которая показана на Рис. 6.8. На том же рисунке сплошными линиями 1 и 2 приведены подобные зависимости для сильных солнечных вспышек и солнечных вспышек с СКЛ, соответственно, которые будут обсуждаться в следующем разделе. Вне зависимости от силы магнитных бурь число бурь имеет два максимума: весной и осенью. Этот результат подтверждает эффект Russell-McPherron [209, Russell and McPherron, 1973], который может быть связан с годовой эволюцией ориентации магнитного диполя Земли относительно линии Солнце-Земля. В частности, такое объяснение этого эффекта возможно при предположении, что энергия СВ поступает в магнитосферу не только,

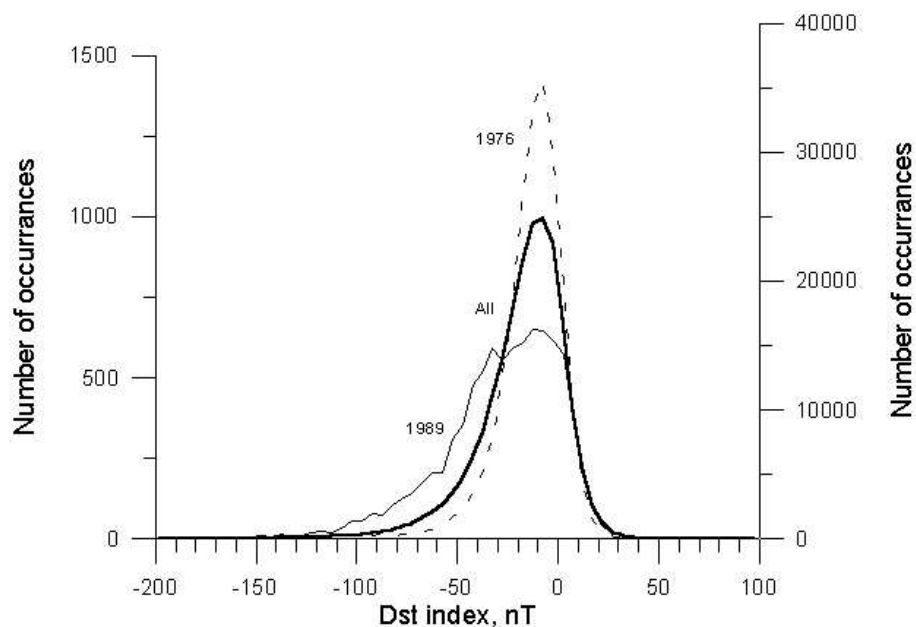


Рис. 6.7: Распределения среднечасовых значений  $D_{st}$  индекса за 1976-2000 годы (толстая линия, шкала справа), за спокойный 1976 и возмущенный 1989 годы (штриховая и тонкая сплошная линии, шкала слева).

когда просто существует компонента ММП параллельная земному диполю, но и эта компонента перпендикулярна набегающему потоку СВ. В этом случае при отклонении оси вращения Земли в перпендикулярном линии Солнце-Земля направлении в весенние и осенние месяцы (вблизи дней равноденствия) дополнительный вклад в южную компоненту ММП может вносить и  $B_y$  компонента ММП. Если из солнечно-эклиптической (GSE) системы координат перейти в солнечно-магнитную (GSM), в которой магнитный диполь Земли всегда лежит в плоскости  $XZ$ , то изменение направления диполя будет учитываться автоматически. В дальнейшем изложении мы будем использовать GSM систему координат.

### 6.3 Сопоставление бурь с солнечными источниками

Сопоставление появления магнитных бурь с солнечными источниками начнем с анализа солнечных вспышек. Каталог сильных вспышек с СКЛ приведен в Табл. 6.1, в которой даются дата и время вспышки, ее класс по рентгеновским и оптическим наблюдениям, ее координаты и номер области на Солнце. Кроме того, мы добавили в этот каталог некоторую дополнительную информацию о типах СВ, описание которой и метод ее получения будут описаны ниже. Если удалось идентифицировать тип межпланетного возмущения (ими в основном оказались MC, CIR и IS), то указывается этот тип возмущения, дата и

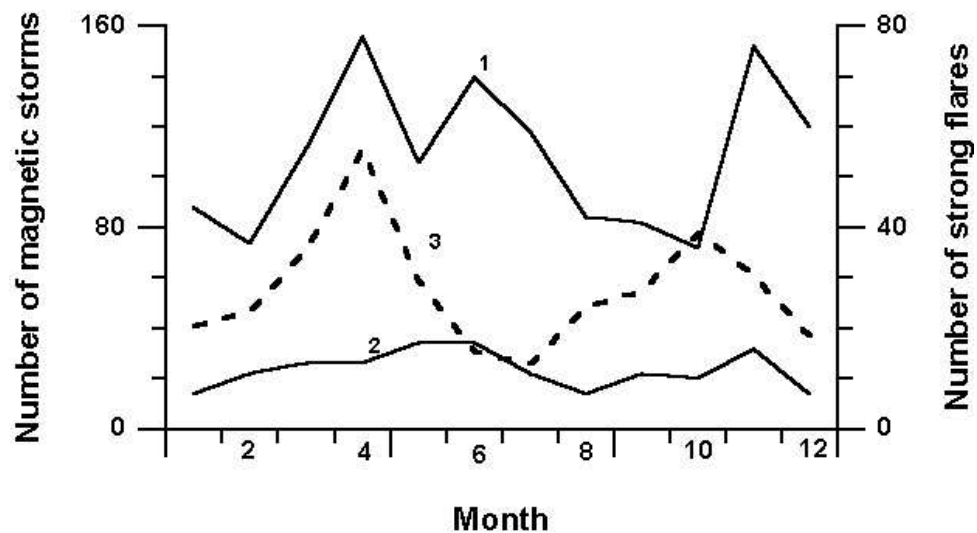


Рис. 6.8: Распределения числа сильных солнечных вспышек (сплошная линия 1) и вспышек с СКЛ (сплошная линия 2) и числа сильных магнитных бурь (штриховая линия 3) по месяцам, полученные методом наложения эпох за период 1976-2000 годов.

время его начала, а также минимум наблюдаемого  $D_{st}$  индекса. Если тип межпланетного возмущения не удастся определить, или для соответствующего интервала отсутствуют данные, то дается дата и время минимума  $D_{st}$ . Для вспышек, для которых не удалось найти магнитной бури в заданном временном интервале (см. ниже), данные о  $D_{st}$  и типе СВ отсутствуют. Мы исключили из анализа вспышки, класс которых был ниже M0 или для которых отсутствовала информация о времени ее начала, а также вспышки, у которых время предшествующих вспышек отличалось менее 2 суток. Таким образом, мы получили список из 126 сильных солнечных вспышек с СКЛ [27, Ермолаев и Ермолаев, 2002]. Подобный анализ был проведен и для всех вспышек класса M5 и выше, и таких вспышек оказалось 653, что слишком много, чтобы привести этот список здесь полностью. Ниже будет показано, что большинство статистических характеристик для обоих наборов солнечных вспышек оказывается близким.

Хотя приведенные на Рис. 6.8 данные о солнечных вспышках обладают сравнительно небольшой статистикой, можно предположить, что распределения числа бурь и числа сильных вспышек по месяцам имеют экстремумы в разные месяцы года. Если двухпиковое распределение чисел бурь по месяцам года хорошо объясняется эффектом Russell-McPherron [209, Russell and McPherron, 1973] (см. предыдущий раздел 6.2), то трехпиковое распределение числа сильных вспышек (и вообще их возможная корреляция с периодом движения Земли вокруг Солнца) представляется неожиданным. Тем не менее, рисунок демонстрирует отсутствие корреляции вспышек и магнитных бурь на масштабах  $\sim 1$  месяца.

Таблица 6.1: Сильные солнечные вспышки с СКЛ и соответствующие им межпланетные явления и минимумы  $D_{st}$  индекса

NN	Дата	Солнечные вспышки		Коорд.	Н-р обл.	Корре- ляция соб.	Межпланетные явления		Дата	Время UT	$D_{st}$ нТ
		Время UT	Класс рен/опт				Тип СВ	Гран.			
1	30.04.1976	21.14	X2/2B	S09W47	700	+	MC ?	IS	02.05.1976	06	-107
2	19.09.1977	10.54	X2/3B	N08W58	889	+/-	no data		21.09.1977	10	-72
3	22.11.1977	10.06	X1/2N	N24W38	939	+	MC	IS	25.11.1977	12	-87
4	13.02.1978	02.55	M7/0B	N22W13	1001	+/-	no data		15.02.1978	11	-108
5	11.04.1978	13.53	X2/2B	N19W54	1057	+	MC ?	IS	13.04.1978	18	-80
6	28.04.1978	13.06	X5/4B	N22E41	1092	+	no data		01.05.1978	23	-150
7	07.05.1978	03.30	X2/2B	N22W64	1095	+/-	no data	Bz<-5	09.05.1978	08	-132
8	31.05.1978	10.09	M5/2B	N23W50	1129	-/+	?	IS	04.06.1978	13	-71
9	22.06.1978	17.09	M2/3B	N19E18	1164	-/+	no data	Bz<-5	26.06.1978	10	-77
10	23.09.1978	10.23	X1/3B	N35W50	1294	-			..		
11	10.11.1978	00.42	M1/2N	N17E02	1385	-/+		IS	12.11.1978	01	-93
12	16.02.1979	02.00	X2/2B	N15E48	1574	-			..		
13	05.06.1979	05.29	X2/1N	N20E16	1781	-			..		
14	18.08.1979	14.16	X6/1B	N10E90	1943	-			..		
15	14.09.1979	08.02	X2/	N10E90	1994	+	?	Bz<-10	18.09.1979	00	-158
16	15.11.1979	16.39	M1/0B	N34W25	2110	-			..		
17	17.07.1980	06.03	M3/1B	S12E06	2562	+/-	CIR ?	IS/LE	18.07.1980	18	-80
18	30.03.1981	00.49	M3/2N	N13W74	2993	+/-	?	Bz<-5	31.03.1981	17	-67
19	10.04.1981	16.55	X2/3B	N09W40	3025	+/-	MC ?	IS	12.04.1981	15	-311
20	24.04.1981	14.00	X5/2B	N18W50	3049	+/-	MC ?	IS	26.04.1981	08	-95
21	08.05.1981	22.52	M7/2B	N09E37	3099	+/-	CIR ?	IS/LE	10.05.1981	21	-137
22	13.05.1981	04.25	X1/3B	N11E58	3106	+	IS	IS	16.05.1981	06	-119
23	20.07.1981	13.29	M5/1B	S26W75	3204	+	IS		23.07.1981	07	-89
24	07.08.1981	19.16	M4/2B	S10E24	3257	-			..		
25	07.10.1981	23.08	X3/1B	S19E88	3390	-	MC ?	IS	10.10.1981	13	-116
26	09.12.1981	18.54	M5/3B	N12W16	3496	-			..		
27	30.01.1982	23.58	X1/3B	S13E19	3576	-			..		
28	03.06.1982	11.46	X8/2B	S09E72	3763	-			..		
29	06.06.1982	16.37	X12/3B	S11E26	3763	+	CIR ?	IS/LE	09.06.1982	01	-66
30	09.07.1982	07.42	X9/3B	N17E73	3804	+	MC ?	IS	11.07.1982	12	-64
31	22.07.1982	17.34	M4/0F	N29W86	3804	+/-	RSI ?		24.07.1982	16	-75
32	04.09.1982	04.00	M4/3N	N11E30	3886	+/-	MC ?	IS	05.09.1982	21	-289
33	22.11.1982	18.28	M7/1N	S11W43	3994	-			..		
34	26.11.1982	02.53	X4/2B	S11W87	3994	-			..		
35	07.12.1982	23.54	X2/0B	S14W81	4007	-			..		
36	15.12.1982	02.02	X12/2B	S10E24	4026	-/+	no data	Bz<-5	16.12.1982	11	-106
37	19.12.1982	16.24	M9/2B	N10W75	4022	+/-	no data	Bz<-5	21.12.1982	05	-101
38	25.12.1982	07.52	X2/1B	S14E31	4033	-			..		
39	03.02.1983	06.19	X4/3B	S19W08	4077	-/+	no data		04.02.1983	22	-172
40	17.02.1984	23.01	X2/2B	0	0	-			..		
41	14.03.1984	03.34	M2/2B	S12W42	4433	-			..		
42	25.04.1984	00.05	X13/3B	S12E43	4474	+/-	no data		26.04.1984	20	-71
43	22.05.1984	15.03	M6/2B	S09E24	4492	-			..		
44	31.05.1984	11.42	M1	S09W90	4492	-			..		
45	21.01.1985	23.50	X4/2B	S08W38	4617	-			..		
46	24.04.1985	09.35	X1/3B	N06E27	4647	+	?	Bz<-5	28.04.1985	10	-98
47	09.07.1985	02.04	M2/1B	S16W36	4671	+	no data	Bz<-5	11.07.1985	18	-65
48	06.02.1986	06.25	X1/3B	S04W06	4711	-/+	MC ?	LE	07.02.1986	16	-307
49	14.02.1986	09.29	M6/1B	N01W76	4713	-			..		
50	04.05.1986	10.07	M1	N06W90	4717	-/+	MC ?	LE	05.05.1986	12	-94
51	07.11.1987	20.14	M1	N31W90	4875	-			..		
52	02.01.1988	21.45	X1/3B	S34W18	4912	+	no data		06.01.1988	19	-80
53	30.06.1988	09.06	M9/2B	S16E22	5060	-			..		
54	23.08.1988	18.04	M2/EPL	N24E90	5125	-			..		
55	12.10.1988	05.11	X2/2N	S20W66	5175	-			..		
56	07.11.1988	11.05	M3/1N	S17W47	5212	-/+	?	Bz<-5	08.11.1988	14	-63
57	13.11.1988	23.09	M3/1N	S23W27	5227	-			..		
58	15.12.1988	05.05	X1/1N	N27E59	5278	+/-	?	Bz<-5	17.12.1988	05	-77
59	04.01.1989	17.53	M4/1N	S20W60	5303	-			..		
60	06.03.1989	14.05	X15/3B	N35E69	5395	+	IS		08.03.1989	18	-100
61	17.03.1989	17.44	X6/2B	N33W60	5395	+	no data		21.03.1989	07	-68
62	23.03.1989	19.48	X1/3B	N18W28	5409	+/-	no data		27.03.1989	23	-87
63	09.04.1989	01.05	X3/4B	N35E29	5441	-/+	IS		13.04.1989	22	-100
64	04.05.1989	11.15	M5/2N	S20W36	5464	+	IS		07.05.1989	06	-90
65	22.05.1989	00.37	M5/2B	S21E16	5497	+/-	no data		26.05.1989	23	-66
66	29.06.1989	21.27	M3/2B	N26W60	5555	-			..		
67	25.07.1989	08.44	X2/2N	N25W84	5603	-			..		
68	12.08.1989	14.27	X2/2B	S16W37	5629	-/+	MC ?	IS	14.08.1989	00	-145
69	03.09.1989	14.32	X1/1B	S18E16	5669	-/+	no data		04.09.1989	06	-67
70	12.09.1989	08.14	M5/EPL	S18W79	5669	+	no data	IS	15.09.1989	02	-124

Таблица 6.2: Продолжение Табл. 6.1

NN	Дата	Солнечные вспышки				Корре- ляция соб.	Межпланетные явления				$D_{st}$ нТ
		Время UT	Класс рен/опт	Коорд.	Н-р обл.		Тип СВ	Гран.	Дата	Время UT	
71	29.09.1989	11.33	X9/EPL	S26W90	5698	-					
72	19.10.1989	12.58	X13/4B	S27E10	5747	+/-	no data		24.10.1989	09	-74
73	15.11.1989	06.59	X3/3B	N11W26	5786	+	no data		17.11.1989	21	-266
74	25.11.1989	23.55	X1/2N	N30E05	5800	-					
75	30.11.1989	12.29	X2/3B	N26W59	5800	+	no data		02.12.1989	04	-85
76	19.03.1990	05.08	X1/2B	N31W43	5969	+/-	CIR ?	IS/LE	21.03.1990	00	-134
77	28.03.1990	07.51	M4/2N	S04W37	5988	+/-	CIR ?	IS/LE	30.03.1990	06	-187
78	04.04.1990	13.38	M7/0N	N22E72	6007	-					
79	15.04.1990	03.02	X1/2B	N32E57	6022	+	no data		17.04.1990	13	-113
80	21.05.1990	22.19	X5/2B	N35W36	6063	-					
81	24.05.1990	20.51	X9/1B	N33W78	6063	+	no data		27.05.1990	08	-87
82	12.06.1990	05.41	M6/2B	N10W33	6089	+/-	MC ?	IS	14.06.1990	03	-93
83	30.07.1990	07.36	M4/2B	N20E45	6180	-					
84	31.01.1991	02.30	X1/2B	S17W35	6469	-/+	no data		01.02.1991	23	-73
85	25.02.1991	08.19	X1/2N	S16W80	6497	-					
86	22.03.1991	22.47	X9/3B	S26E28	6555	-/+	no data		24.03.1991	10	-298
87	02.04.1991	23.27	M6/3B	N14W00	6562	+/-	no data		04.04.1991	20	-83
88	13.05.1991	01.44	M8	S09W90	6615	+/-	no data		14.05.1991	17	-74
89	04.06.1991	03.52	X12/3B	N30E70	6659	-/+	no data		09.06.1991	19	-73
90	15.06.1991	08.21	X12/3B	N33W69	6659	+	IS ?		17.06.1991	11	-70
91	28.06.1991	06.26	M6	N30E85	6703	-					
92	07.07.1991	02.23	X1/2B	N26E03	6703	-/+	CIR ?	IS/LE	08.07.1991	18	-194
93	10.07.1991	12.28	M3/2N	S22E34	6718	+	no data		13.07.1991	15	-183
94	25.08.1991	01.15	X2/2B	N25E64	6805	-					
95	29.09.1991	15.33	M7/4B	S21E32	6853	+	no data		02.10.1991	03	-164
96	27.10.1991	05.48	X6/3B	S13E15	6891	+	MC ?	IS	30.10.1991	23	-196
97	30.10.1991	06.34	X2/3B	S08W25	6891	-					
98	06.02.1992	10.48	M4/2B	S13W10	7042	+	MC ?	IS	08.02.1992	15	-201
99	15.03.1992	01.54	M7/3B	S14E29	7100	-					
100	08.05.1992	15.46	M7/4B	S26E08	7154	-/+	no data	IS	09.05.1992	19	-288
101	25.06.1992	20.14	X3/2B	N09W67	7205	-/+	no data		01.07.1992	03	-89
102	03.08.1992	07.06	M4/1N	S09E68	7248	-/+	MC ?	IS	04.08.1992	14	-77
103	30.10.1992	18.16	X1/2B	S22W61	7321	+	no data		02.11.1992	06	-70
104	12.03.1993	18.15	M7/3B	S00W51	7440	+	no data		15.03.1993	16	-90
105	20.02.1994	01.41	M4/3B	N09W02	7671	-/+	MC ?	IS	21.02.1994	09	-144
106	19.10.1994	21.27	M3/1F	N12W24	7790	+	no data		23.10.1994	06	-71
107	20.10.1995	06.07	M1/0F	S09W55	7912	-					
108	04.11.1997	05.58	X2/2B	S14W33	8100	+	MC	IS	06.11.1997	22	-110
109	20.04.1998	10.21	M1/EPL	S43W90	8194	+	CIR	IS/LE	23.04.1998	18	-69
110	02.05.1998	13.42	X1/3B	S15W15	8210	-/+	MC	IS	04.05.1998	03	-205
111	06.05.1998	08.09	X2/1N	S11W65	8210	+	?	Bz<-5	09.05.1998	15	-63
112	24.08.1998	22.12	X1/3B	N30E07	8307	-/+	CIR	IS/LE	26.08.1998	07	-155
113	23.09.1998	07.13	M7/3B	N18E09	8340	+/-	MC	IS	24.09.1998	23	-207
114	30.09.1998	13.50	M2/2N	N23W81	8340	-					
115	20.01.1999	20.04	M5	N27E90	0	-					
116	03.05.1999	06.02	M4/2N	N15E32	8525	-					
117	04.06.1999	07.03	M3/2B	N17W69	8552	-					
118	17.02.2000	20.35	M1/2N	S29E07	8872	-					
119	06.06.2000	15.25	X2/3B	N20E18	9026	+/-	CIR	IS/LE	08.06.2000	09	-85
120	10.06.2000	17.02	M5/3B	N22W38	9026	-					
121	14.07.2000	10.24	X5/3B	N22W07	9077	-/+	CIR	LE	15.07.2000	15	-300
122	22.07.2000	11.34	M3/2N	N14W56	9085	-					
123	12.09.2000	12.13	M1/2N	S17W09	Filam	-/+	CIR	IS/LE	17.09.2000	16	-172
124	16.10.2000	07.28	M2	N04W90	9182?	-					
125	08.11.2000	23.28	M7/mu	N00-10	9212	, -					
				W75-80	13,18						
126	24.11.2000	05.02	X2/3B	N20W05	9236	+/-	CIR	LE	29.11.2000	05	-117

На Рис. 6.2-6.6 помимо среднечасовых значений  $D_{st}$  индекса, представленных сплошной линией, вертикальные отрезки в верхней части каждой панели указывают моменты сильных солнечных вспышек, причем отрезки, направленные вверх от сплошной горизонтальной линии, соответствуют вспышкам на западной части диска Солнца, вниз - на восточной части, а длина отрезка пропорциональна классу вспышки (от М5 до X20). Из рисунка видно, что большому количеству бурь, в том числе и сильным, не соответствует никаких вспышек, а многие вспышки наблюдаются далеко по времени от бурь, перед или после них. Мы сопоставили все вспышки с бурями по следующему алгоритму: если возмущение в СВ (или минимум  $D_{st}$  индекса, если тип возмущения нельзя было определить) наблюдалось через 2-4 суток после вспышки, то такая буря рассматривалась как потенциальный кандидат на солнечный источник этой бури; вспышка рассматривалась как вероятная, если она попадала уже в расширенный интервал времен 1,5-5 суток (т.е. в два подинтервала 1.5-2 и 4-5 суток), маловероятная, если в интервал 1-6 суток, и невероятная, если вообще не попадала в последний интервал. Нужно отметить, что время 2-4 суток соответствует средней скорости распространения на трассе Солнце-Земля 430 - 870 км/с, что является обычной скоростью СВ на орбите Земли. Результаты такого анализа показаны в виде гистограмм на Рис. 6.9, причем штриховой и сплошной линиями - для западных и восточных вспышек соответственно, а гистограммы *a*, *b*, *c* и *d* относятся, соответственно, к явным источникам (31,1%, для вспышек с СКЛ 25,4%) бурь, к вероятным (11,6 и 18,3%) и маловероятным (9,0 и 19,0%) источникам и вспышкам, не приведшим к буре (48,2 и 37,3%). Различия между двумя наборами невелики и заключаются в более высоких значениях в группах *a* и *d* для большого набора, при более низких в *c* и *b*. Как видно из Табл. 6.1 и Рис. 6.10, распределения вспышек всех типов *a*, *b*, *c* и *d* по солнечному диску практически не различаются, и вспышки всех типов наблюдаются в широких диапазонах солнечных широт и долгот. Полное число западных вспышек в целом по обоим наборам вспышек оказалось больше, чем восточных, но после нормирования на число тех и других вспышек разницы между долями западных и восточных вспышек во всех гистограммах практически исчезают.

Для вспышек из первых трех групп мы исследовали зависимость минимума  $D_{st}$  индекса во время бури от класса (т.е. потока рентгеновского излучения или энергии) вспышки как для сильных вспышек (верхняя панель), так и для вспышек с СКЛ (нижняя панель). Рис. 6.11 показывает эту зависимость, при этом кружки, треугольники и ромбики соответствуют явным, вероятным и маловероятным источникам, а светлые и темные значки - западным и восточным вспышкам, соответственно. На рисунке не видно зависимости силы бури от энергии вспышки ни для всех вспышек в целом из двух наборов, ни для какого-нибудь одного из выбранных нами подклассов вспышек, хотя поток рентгеновского излучения приведенных вспышек меняется на рисунке на 2,5 порядка. Интересно, что для самых сильных вспышек на обоих панелях нет

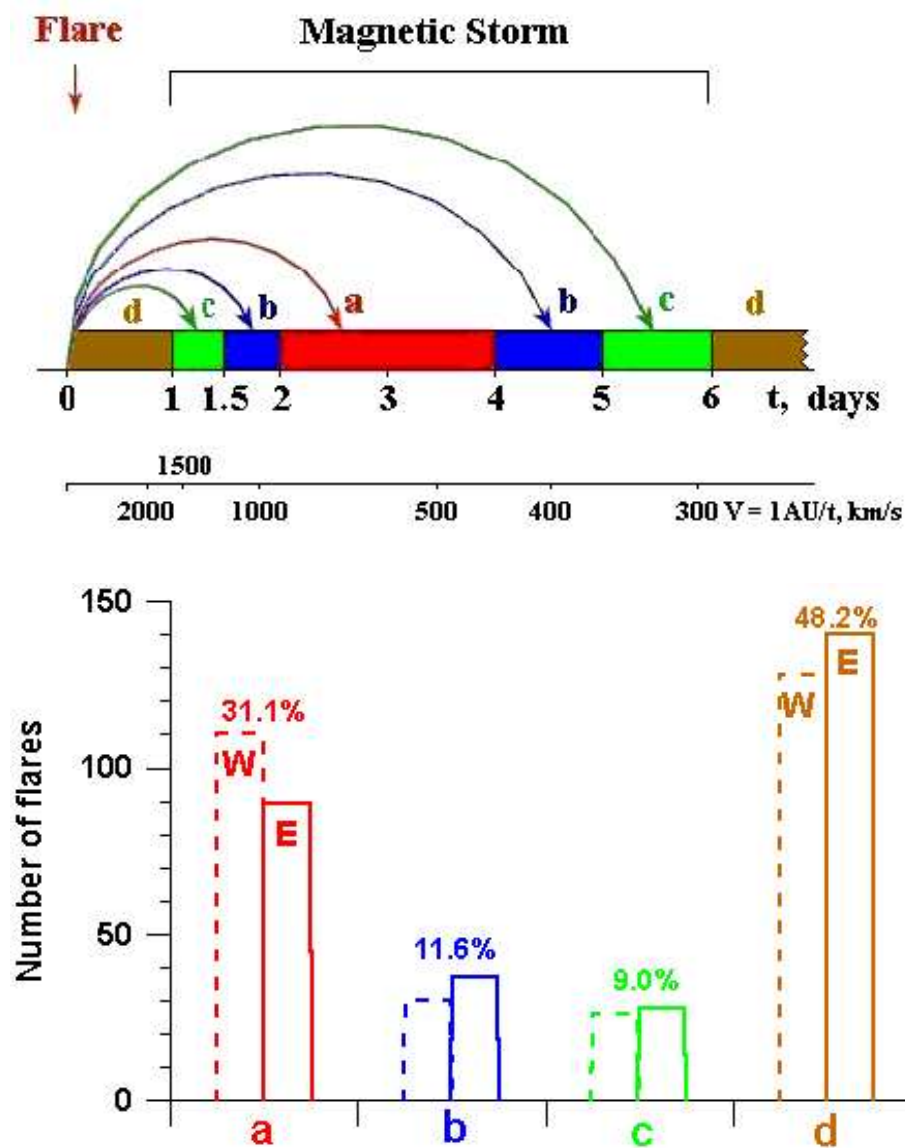


Рис. 6.9: Верхняя панель: схематическое пояснение к определению возможной геоэффективности вспышки ( $a, b, c$  и  $d$ ) по временной задержке. Нижняя панель: число западных и восточных сильных солнечных вспышек (штриховая и сплошная линии), после которых явно ( $a$ ), вероятно ( $b$ ), маловероятно ( $c$ ) наблюдались и не наблюдались ( $d$ ) магнитные бури.

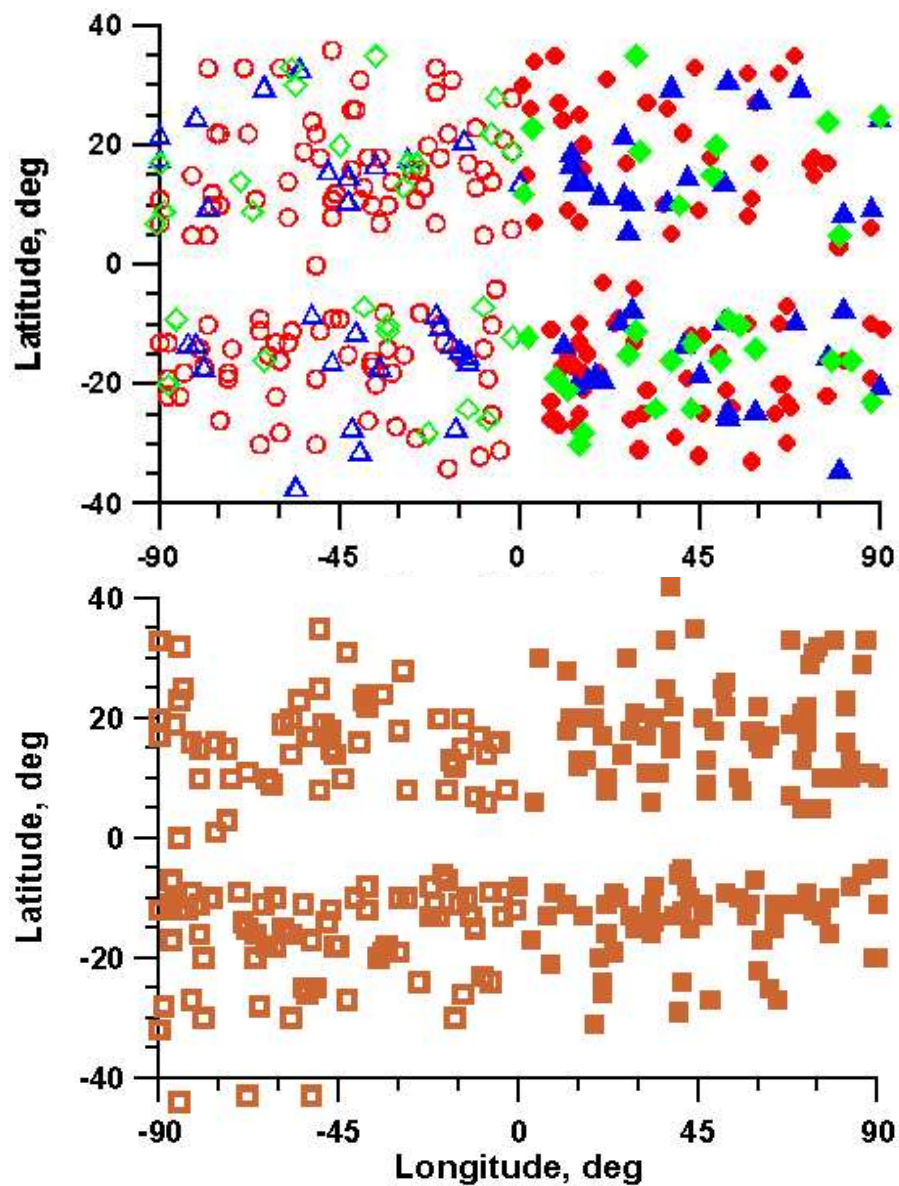


Рис. 6.10: Верхняя панель: положение геоэффективных сильных вспышек на солнечном диске - кружки, треугольники и ромбики - события типов  $a, b$  и  $c$ . Нижняя панель: положение негеоэффективных сильных вспышек - события типа  $d$  (см. текст).



ни одной сильной бури с  $D_{st}$  индексом меньше -100 нТ, в то время как для всплесков меньшего класса наблюдаются бури с  $D_{st}$  индексом  $\sim$  -300 нТ и ниже. Среди сильных всплесков с СКЛ нет возможных кандидатов на источник самой сильной за проанализированный 25-летний период бури 14 марта 1989 г., в то время как среди остальных всплесков их наблюдается даже 3 с классами от X1 до X5, т.е. по времени запаздывания кандидатами на источник этой бури могут являться 3 всплески, или суммарный эффект от этих всплесков и привел к сильнейшей буре.

Если сделать аналогичную, но обратную по времени "интерполяцию" данных, начиная не с моментов сильных солнечных всплесков, а с моментов сильных магнитных бурь с  $D_{st} < -100$  нТ, то мы получим явных кандидатов на источник бурь 15% сильных всплесков, по 5% - вероятных и маловероятных и для 75% сильных бурь не обнаружим сильных всплесков (для более сильных бурь с  $D_{st} < -200$  нТ эти числа соответственно будут 25%, 12%, 10% и 53%, но статистика для таких бурь будет маленькой - 32 бури).

Анализ геоэффективности другого мощного солнечного возмущения - выбросов корональной массы (СМЕ) - по опубликованным наборам и набору, представленному в базе данных спутника *SOHO* за 1996-2000 годы (см. раздел 6.1), дает противоречивые результаты.

С одной стороны, мы проанализировали опубликованный в статье [123, Gopalswamy et al., 2000] список СМЕ, обнаруженных в 1996-1998 годах с помощью коронографа на космической обсерватории *SOHO* и зарегистрированных на космическом аппарате *WIND* как МС. Результаты этого анализа показывают, что из 28 таких СМЕ 16 (57% СМЕ) привели к средним и сильным магнитным бурям: к 10 средним бурям с  $D_{st}$  от -60 до -100 нТ и к 6 сильным бурям с  $D_{st} < -100$  нТ. В работе [240, Webb, 1996] по данным фотометра на космических аппаратах *HELIOS 1, 2* в период 1975-1983 годов было зарегистрировано 38 СМЕ,двигающихся вдоль линии Солнце-Земля. По методике оценки времени распространения СМЕ от Солнца до Земли и анализу возмущенности магнитосферы по  $K_p$  индексу было получено, что половина СМЕ (19) привела к бурям, 13 СМЕ - нет, и для 6 СМЕ заключение было сделать затруднительно. Можно предположить, что часть из этих 6 СМЕ была все же геоэффективна. Поэтому оценка 60% геоэффективных СМЕ, полученная по двум разным выборкам для трех разных космических аппаратов, может рассматриваться достаточно обоснованной.

С другой стороны, в наборе СМЕ, зарегистрированных на КА *SOHO* в 1996-2000 годах, содержится 125 так называемых гало-СМЕ (т.е. СМЕ, занимающие на изображениях все пространство вокруг Солнца и, как предполагается, движущиеся в сторону наблюдателя, к Земле), причем из них 24 сопровождалось сильными всплесками из уже описанного набора сильных всплесков. Примененная к этим СМЕ описанная выше методика определения возможной геоэффективности по временной задержке между СМЕ и магнитной бурей дает низкую геоэффективность СМЕ (см. Рис. 6.12) : для типа *a* 22,4%

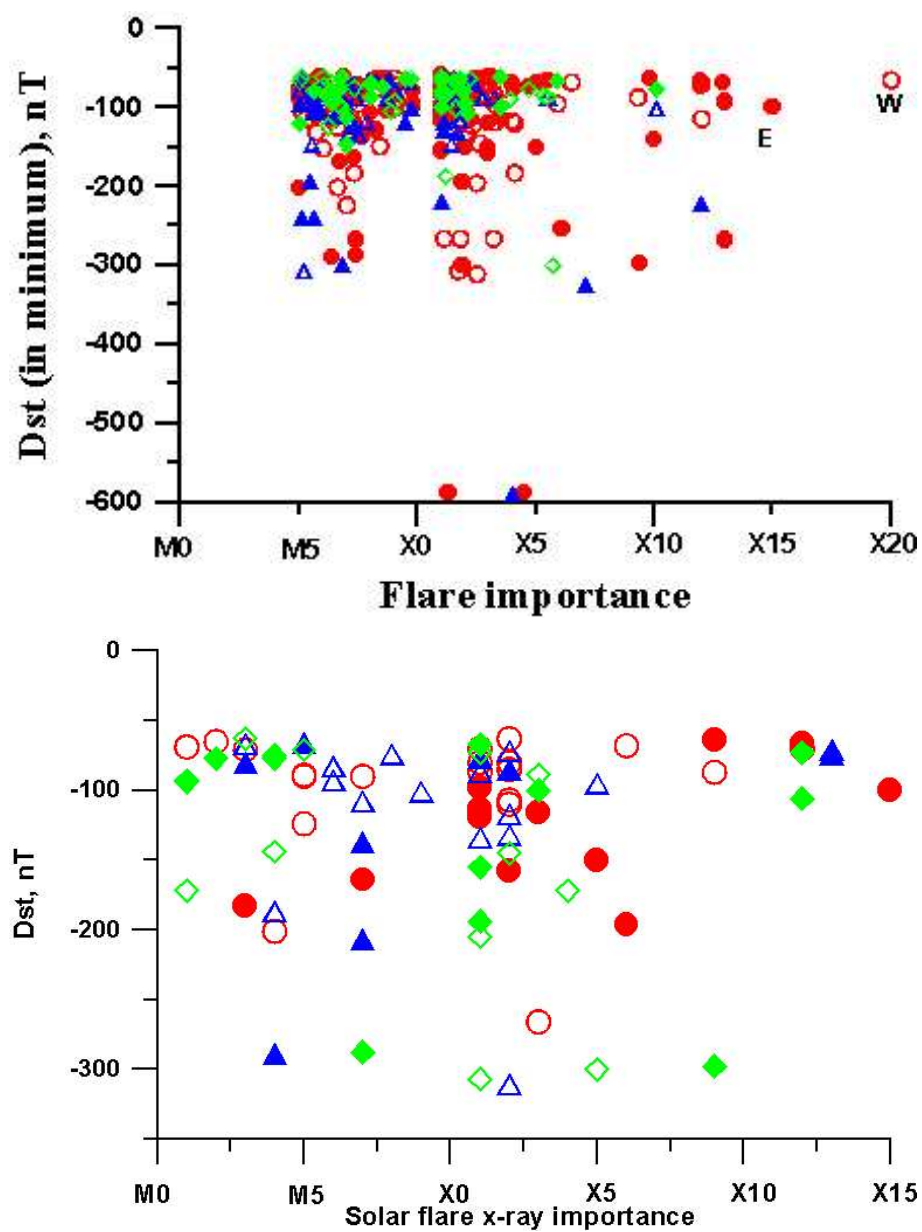


Рис. 6.11: Зависимость минимума  $D_{st}$  индекса во время магнитных бурь от класса (потока энергии) сильных солнечных вспышек (верхняя панель) и вспышек с СКЛ (нижняя панель). Обозначения: светлые и темные значки - западные и восточные вспышки; кружки, треугольники и ромбики - события типа  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

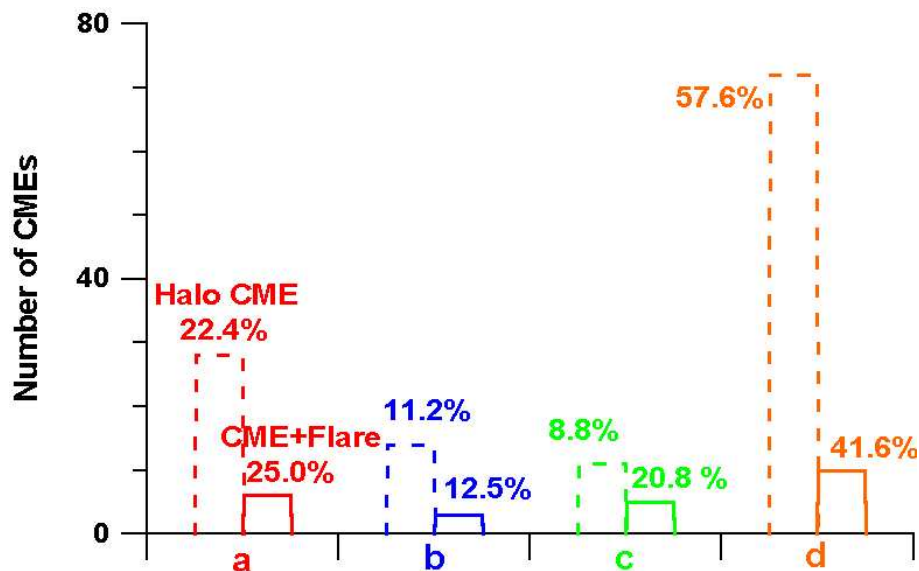


Рис. 6.12: Число CME и CME, сопровождавшихся солнечными вспышками (штриховая и сплошная линии), после которых явно (a), вероятно (b), маловероятно (c) наблюдались и не наблюдались (d) магнитные бури.

и 25,0%, для типа *b* 11,2% и 12,5%, для типа *c* 8,8% и 20,8% и для типа *d* 57,6% для всех CME и 41,6% для CME, сопровождавшихся солнечными вспышками. Полученная геоэффективность CME оказывается ниже не только геоэффективности опубликованных наборов CME, но даже и геоэффективности солнечных вспышек. Различия между нашими оценками геоэффективности CME и опубликованными данными, по-видимому, связаны с предварительным отбором событий перед публикациями.

## 6.4 Сопоставление бурь с межпланетными источниками

При рассмотрении межпланетных источников мы не анализировали всего массива данных по СВ, а исходя из моментов наблюдения магнитных бурь, искали межпланетные возмущения, которые могли предшествовать и приводить к средним и сильным магнитосферным возмущениям. Поэтому обсуждаемая ниже геоэффективность межпланетных возмущений имеет несколько иной смысл, чем упомянутая нами для солнечных вспышек в начале предыдущего раздела 6.3. Описание использованных нами методов идентификации типов СВ подробно описаны в предыдущих главах, а также в работах [129, 124, 91, 94, Gosling et al., 1991; Gosling and Pizzo, 1999; Burlaga et al., 1998; Crooker, 2000]. Результаты нашего анализа приведены в Табл. 6.1 и

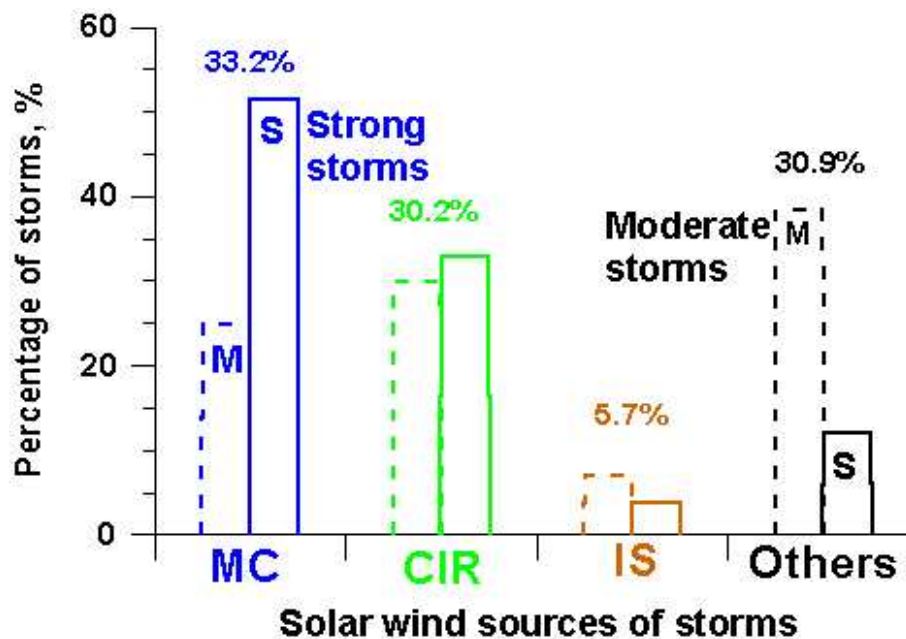


Рис. 6.13: Распределение магнитных бурь по типам возмущений солнечного ветра.

на Рис. 6.2, на котором различными значками показаны идентифицированные типы течений СВ, которые могли бы быть межпланетными источниками сильных бурь (мы не приводим результаты для средних бурь, чтобы сильно не загромождать рисунок). Измерения межпланетных параметров имеются только для  $\sim 2/3$  (404) из 618 средних и сильных магнитных бурь, и это количество позволяет получить распределение между отдельными геоэффективными типами СВ с достаточно хорошей статистикой: межпланетными источниками (в скобках для средних и сильных, соответственно) магнитных бурь в 33.2% (24.9% и 51.5%) случаев являются MC, в 30.2% (29.9% и 32.8%) случаев - CIR, в 5.7% (6.9% и 3.7%) - IS и в 30.9% (38.3% и 11.9%) - другие типы СВ. Это соотношение наглядно демонстрируется на Рис. 6.13. Таким образом, по сравнению со средними бурями доля сильных бурь от MC возрастает от  $\sim 1/4$  до  $\sim 1/2$ , от CIR остается на уровне  $\sim 1/3$ , а от IS и других типов СВ заметно падает.

Анализ поведения параметров солнечного ветра и ММП (на рисунках не показано) для геоэффективных событий в межпланетной среде подтверждает известный факт, что к возмущениям магнитосферы приводят события, в которых большая негативная (южная) компонента ММП наблюдается достаточно длительное время. Как раз подобная ситуация наиболее часто регистрируется перед или внутри MC, в CIR и после прохождения IS, что можно объяснить тем, что если в первоначально невозмущенном солнечном ветре была южная компонента ММП, то в результате динамических процессов во время распространения MC, CIR и IS происходит сжатие и увеличение всех компонент

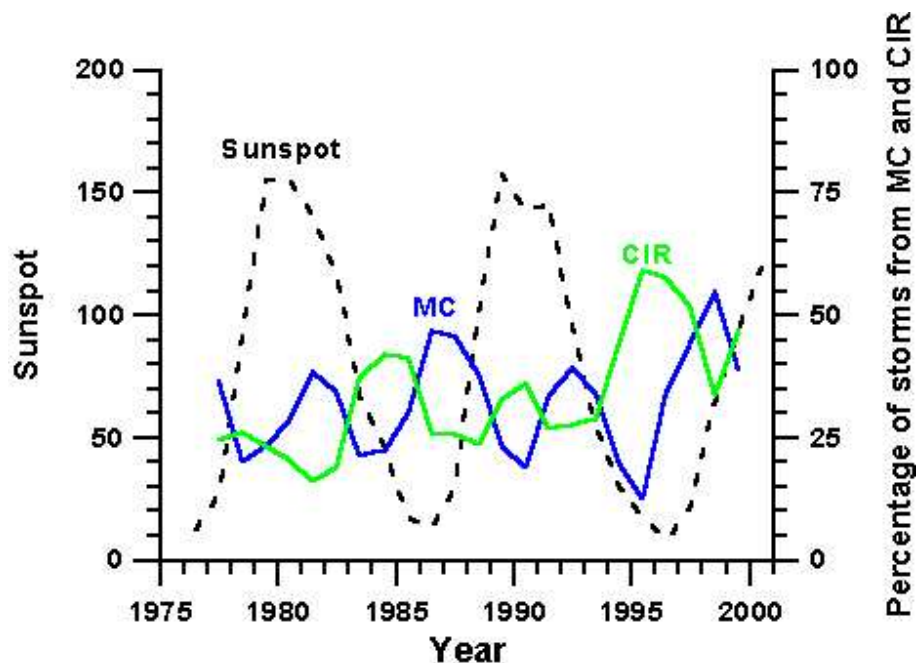


Рис. 6.14: Изменение доли магнитных бурь, возбужденных МС (темная линия) и CIR (светлая линия). Штриховая линия - число солнечных пятен (шкала справа) [27, Ермолаев и Ермолаев, 2002].

ММП в области сжатия, в том числе и компоненты ММП параллельной земному магнитному диполю. Магнитное поле внутри МС обычно выше, чем в обычном СВ, а его спиральная топология приводит к тому, что поле в течение длительного времени может быть повернутым к югу.

По данным космического аппарата *PVO* на расстоянии 0.7 а.е. от Солнца было показано, что на интервале 1979-1988 годов МС наиболее геоэффективны в максимуме солнечного цикла, а CIR - в его минимуме [160, Lindsay et al., 1995]. Здесь мы имеем возможность исследовать изменение доли бурь от МС и CIR в цикле на протяжении 2,5 солнечных циклов. Для этого мы для каждого года нашли отношение суммарного числа средних и сильных бурь соответственно от МС и CIR к числу бурь, для которых было возможно определить тип СВ. Эти результаты представлены на Рис. 6.14. Так как статистика числа среднегодовых бурь невелика, особенно в минимуме цикла, то, чтобы убрать высокочастотные вариации, связанные с малой статистикой, мы провели сглаживание этих отношений скользящим средним по трем точкам. Рис. 6.14 показывает, что кривые для МС и CIR имеют 2 максимума за солнечный цикл.

## 6.5 Реакция магнитосферы на магнитные облака и "слабый" солнечный ветер

В конце 90-х годов в околоземном космическом пространстве была целая международная флотилия космических кораблей, нацеленных на изучение солнечно-земных связей. Сопоставление данных, полученных одновременно в разнесенных точках, позволило изучать влияние различных областей околоземного пространства друг на друга. Стараясь акцентировать внимание на роли крупномасштабных структур солнечного ветра в физике магнитосферы, мы приводим лишь некоторые результаты исследований по реакции геомагнитосферы на магнитные облака. Кроме того, мы рассматриваем влияние на земную магнитосферу редкого явления в солнечном ветре, наблюдавшегося 10-12.05.1999 г., когда плотность плазмы солнечного ветра постепенно уменьшилась в 20 раз по сравнению со средним значением [158, Le et al., 1999]. Хотя это наблюдение значительного падения концентрации в солнечном ветре не единственное (см., например, данные спутника *Прогноз 7* на Рис. 4.7 и статью [204, Richardson et al., 2000]), это событие вызвало заметный резонанс в научных кругах и прессе, по-видимому, из-за возможности достаточно подробно проанализировать его характеристики, начиная от наблюдений Солнца и заканчивая измерениями геомагнитного поля.

### 6.5.1 Магнитные облака и "слабый" солнечный ветер

Для анализа межпланетных условий мы используем ключевые параметры плазмы и магнитного поля, измеренные на КА *WIND*, а в ряде случаев и на других КА (*SOHO* и *IMP-8*). В качестве примера МС рассмотрим известное событие 10-11.01.1997 г., когда приход к Земле МС привел к сильному возмущению магнитосферы и выходу из строя спутника связи *Telstar-401*. Это МС (см. Рис. 6.15 и [91, Burlaga et al., 1998]) имеет как общие с другими МС черты (ударная волна перед МС, высокое и медленно вращающееся магнитное поле  $B$ , низкие плотность  $N$  и температура  $T$  между скачками плотности на переднем и заднем фронтах МС), так и отличительные (магнитная "дыра" и экстремально высокая плотность на заднем фронте (trailing edge - TE), связанная с солнечным фотосферным филаментом).

В анализ были включены 35 магнитных облаков, наблюдавшихся в 1995-1998 г., при этом часть из них была добавлена из списка выбросов корональной массы [123, Gopalswamy et al., 2000], и часть – из анализа параметров солнечного ветра и магнитосферы. Рисунки 6.16 - 6.18 показывают среднечасовые значения  $D_{st}$  индекса для 47 оборотов Солнца (40 месяцев с августа 1995 г. по декабрь 1998 г.). Сильные ( $D_{st} < -100$  нТ) магнитные бури показаны внизу треугольниками. Зеленые и синие горизонтальные линии в верхних частях панелей показывают интервалы наблюдения МС и CIR, а красные вертикальные линии - предшествующие им IS. На рисунках 6.16 - 6.18 видно,

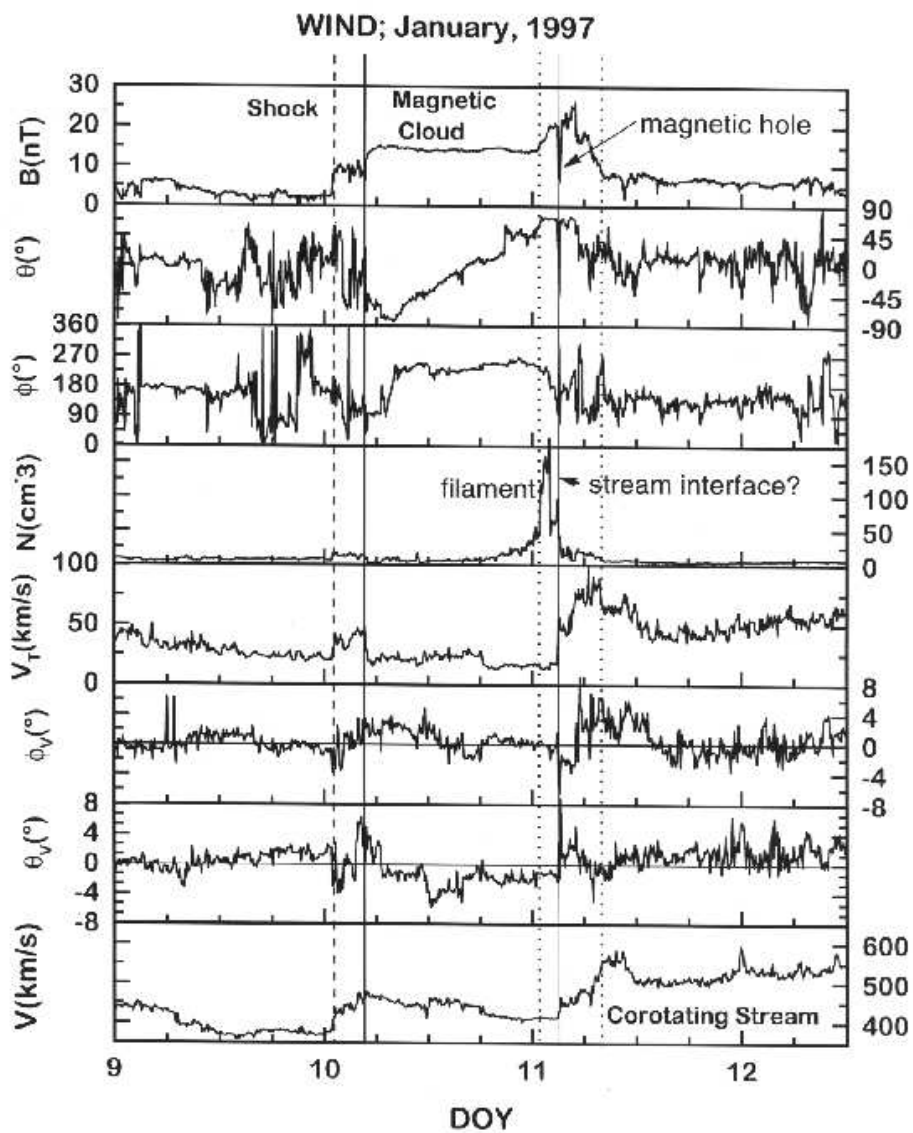


Рис. 6.15: Параметры плазмы и магнитного поля в магнитном облаке 10-11.01.1997 г. по наблюдениям на спутнике *WIND*: верхние три панели - модуль и два угла магнитного поля; плотность, тепловая скорость, последние три панели - два угла и модуль переносной скорости.

что 19 сильных бурь соответствовало 15 MC и 4 CIR. Список рассмотренных событий приведен в Табл. 6.3, которая включает в себя дату и длительность наблюдения MC (в скобках дополнительно указан интервал между IS и LE MC). Кроме того указаны области пространства, которые пересекаются в это время спутником *ИНТЕРБОЛ/Хвостовой Зонд* (далее *ИНТЕРБОЛ-1*): SW - солнечный ветер, MSH - магнитослой (область между головной ударной волной и магнитопаузой), MS - магнитосфера (доли хвоста, плазменный и нейтральный слои, низко- и высоко-широтные пограничные слои).

Как видно из Табл.6.3, в большинстве случаев спутник *ИНТЕРБОЛ -1* находился в различных областях магнитосферы и проводил там измерения параметров плазмы, магнитного поля и энергичных частиц. Спутник *ИНТЕРБОЛ/Авроральный Зонд (ИНТЕРБОЛ-2)*, имеющий низко-апогейную 6-часовую орбиту, измерял различные параметры в полярной магнитосфере. Благодаря разнообразию положений спутников в моменты прихода различных областей MC мы имеем возможность исследовать поведение различных областей магнитосферы при различных условиях в СВ.

Ход гидродинамических параметров плазмы и межпланетного магнитного поля, наблюдаемый в период крайне низкой концентрации СВ на КА *WIND*, представлен на Рис. 6.19. На верхней панели Рис. 6.19 показана также концентрация, измеренная на спутнике *ИНТЕРБОЛ-1*, которую мы умножили на 10, чтобы ее можно было отличить от данных спутника *WIND*. Падение концентрации вызвало значительное увеличение размеров магнитопаузы и головной ударной волны, и, так как спутник *ИНТЕРБОЛ-1* был расположен ближе к Земле, чем аппарат *WIND*, то головная ударная волна последовательно проходила мимо обоих спутников в одну сторону, а затем обратно (моменты пересечения спутниками ударной волны показаны значками BS на верхней панели Рис. 6.19), и при этом спутники на время входили в магнитослой. На фоне обычных значений скорости СВ и ММП концентрация плазмы сильно падает и достигает в 16.00 UT 11.05.1999 г. величины менее  $0.2 \text{ см}^{-3}$ . Хотя имеются некоторые расхождения в оценке концентрации по наблюдениям на различных КА, тем не менее даже и при высшей оценке падение концентрации составляет более 20 раз по сравнению со средней величиной 8-10  $\text{см}^{-3}$ .

## 6.5.2 Геоэффективность рассматриваемых явлений

Степень возмущенности магнитосферы может быть оценена на основе геомагнитных индексов, определяемых по измерениям наземных магнитометрических станций. Для оценки развития крупномасштабной бури используется  $D_{st}$  индекс, описывающий магнитное поле вблизи экватора и возмущенность кольцевого тока. Изменение индекса  $D_{st}$  для MC 10-11.01.1997 г. показано на Рис. 6.20. По-видимому, здесь мы имеем дело с последовательностью двух бурь, так как индекс в течение рассматриваемого интервала имеет два провала в отрицательную сторону - в начале 10.01. и начале 11.01.1997, но



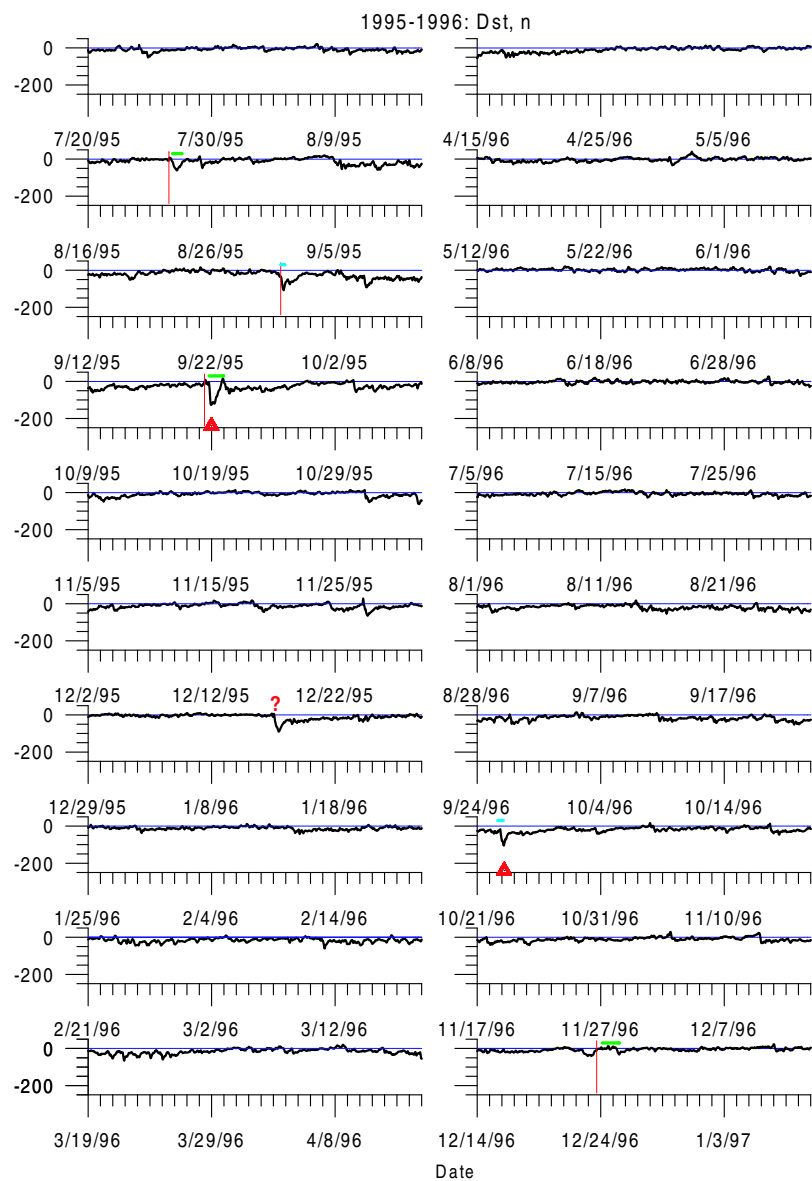


Рис. 6.16: Среднечасовые значения  $D_{st}$  индекса для интервала с августа 1995 г. по декабрь 1988 г., треугольники - сильные магнитные бури, горизонтальные с зеленые и синие отрезки - наблюдения МС и CIR, вертикальная красная линия - наблюдение МУВ.

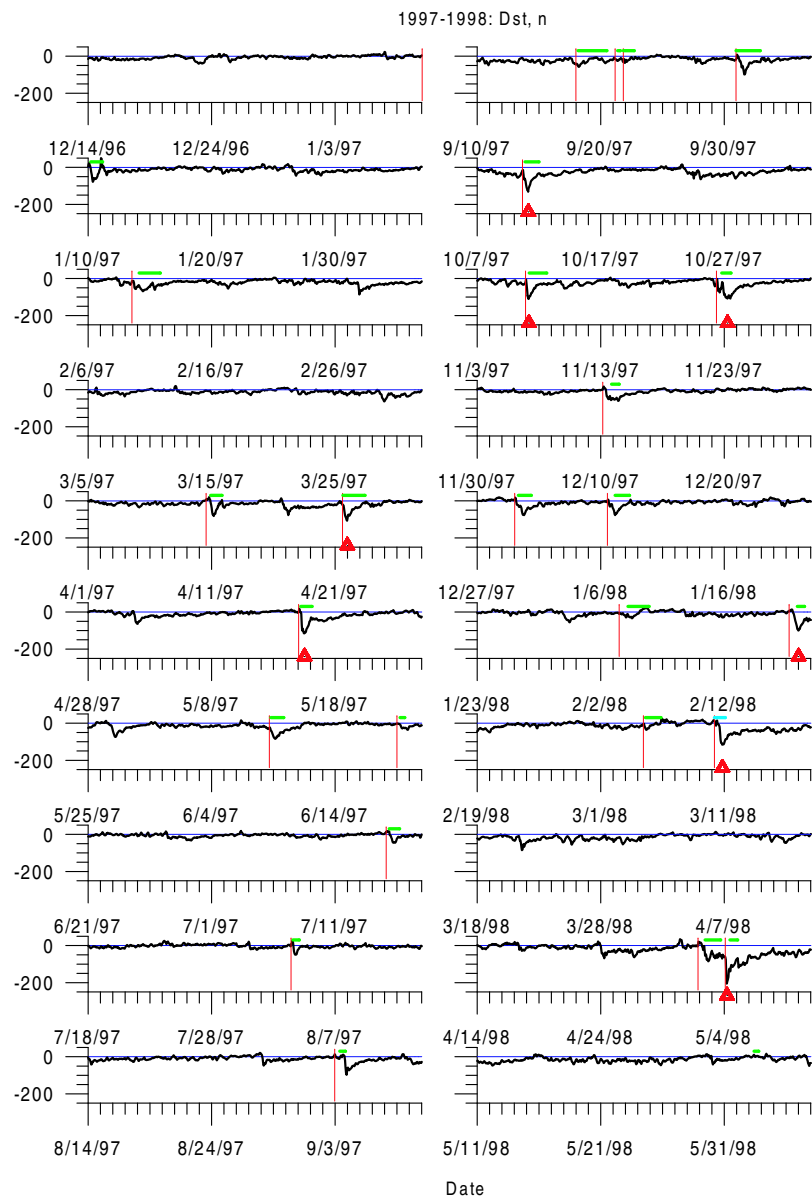


Рис. 6.17: Продолжение Рис. 6.16.

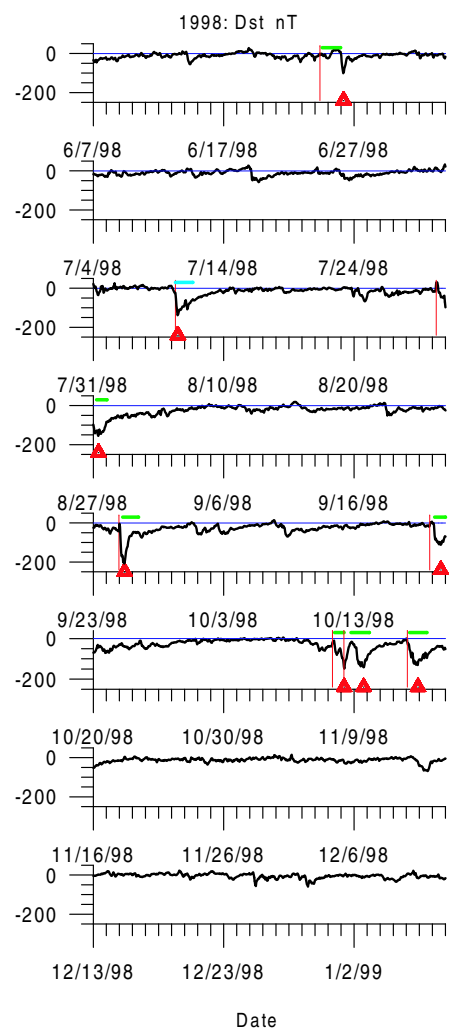


Рис. 6.18: Продолжение Рис. 6.16.

Таблица 6.3: Характеристики магнитных облаков по наблюдениям на различных космических аппаратах и положение спутника *ИНТЕРБОЛ-1*

N	Дата	Длительности, ч МС	(+ IS)	Области пространства по <i>ИНТЕРБОЛ-1</i>	Условия в СВ
1995					
1	IX.22-23	19	(+7)	MS/MSH/SW	Скачки $B_z$ и $P$
2	X.18-19	28	(+8)	MS/MSH/MS	Вариации $B_z$
1996					
3	XII.24-25	39	(+10)	MS/MSH/MS	Скачки $P$
1997					
4	I.10-11	23	(+4)	MS/MSH/MS	СВ с $N \sim 150 \text{ см}^{-3}$
5	II. 9-11	41	(14)	SW/MSH/MS/MSH/SW	$B_z < 0$
6	IV.10-11	22	(+9)	SW	Изменения $B_z$
7	IV.21-23	43	(+1)	SW	Скачки $P$
8	V.15-16	46	(+4)	SW	Изменения $B_z$
9	VI.8-9	24	(+3)	MS/MSH/SW	Скачки $P$
10	VI.19	10	(+6)	SW	Спокойный СВ
11	VII.15-16	45	(+6)	SW	$B_z < 0$
12	VIII.3-4	13	(+4)	SW/MSH/SW	Спокойный СВ
13	IX.03	12	(10)	SW/MSH/SW	Скачки $B_z$
14	IX.18-20	56	(+4)	MS/MSH/MS	Скачки $B_z$
15	IX.21	5	(+5)	MSH	Скачки $P$
16	IX.21-22	19	(+3)	MSH/SW	Скачки $P$
17	X.1-2	42	(+4)	MS/MSH/MS	-
18	X.10-12	45	(+5)	MSH	Скачки $P$
19	XI.07-08	24	(+7)	MS	Вариации $P$ и $B_z$
20	XI.22-23	18	(+10)	MS	$B_z < 0$
21	XII.10-11	15	(+16)	MS	Скачки $B_z$
22	XII.30-31	25	(+7)	MS	Скачки $P$ и $B_z$
1998					
23	I.7-8	29	(+14)	MS	Скачки $B_z$
24	II.4-5	41	(17)	MSH/MS	Скачки $P$
25	II.17-18	14	(16)	MS/MSH/	Скачки $P$ и $B_z$
26	III.4-5	30	(+4)	MS/MSH/SW	Скачки $B_z$
27	V.2-3	?	(14)	SW	$B_z < 0$
28	V.4-5	15	(+9)	SW/MSH	Скачки $B_z$
29	VI.2	8	?	SW	Спокойный СВ
30	VI.24-25	35	(+4)	SW	Скачки $P$
31	IX.25-26	29	(+7)	MSH/MS	Скачки $P$
32	X.18-20	22	(+9)	MS/MSH	Скачки $B_z$
33	XI.7-8	?	(+4)	MS	Вариации $P$ и $B_z$
34	XI. 8-10	34	(+13)	MS	Скачки $P$
35	XI. 13-14	32	(+4)	MS	Скачки $B_z$ и $P$
Средние		27	(+8)		

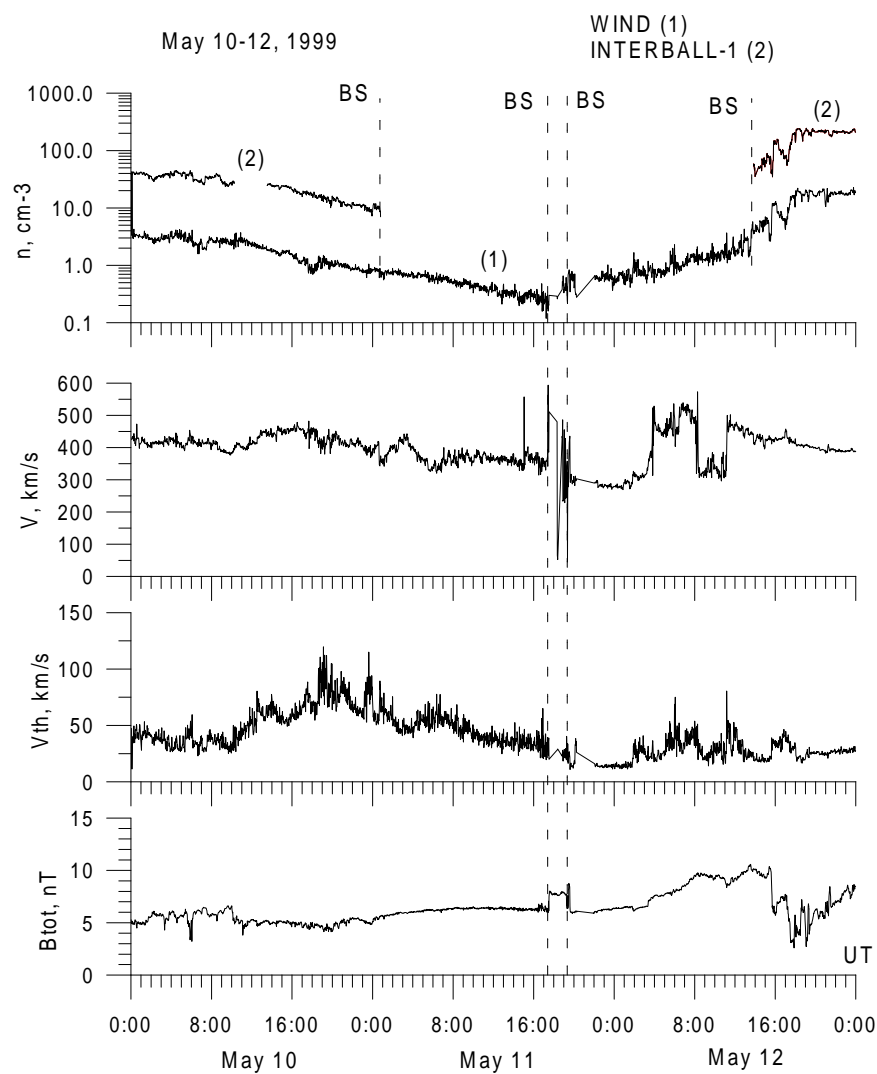


Рис. 6.19: Параметры плазмы и магнитного поля в солнечном ветре с очень маленькой концентрацией 10-12.05.1999 г. по наблюдениям на спутниках *WIND* и *ИНТЕРБОЛ-1*: панели сверху вниз - плотность (данные *ИНТЕРБОЛ-1* умножены на 10), переносная и тепловая скорости, модуль магнитного поля.

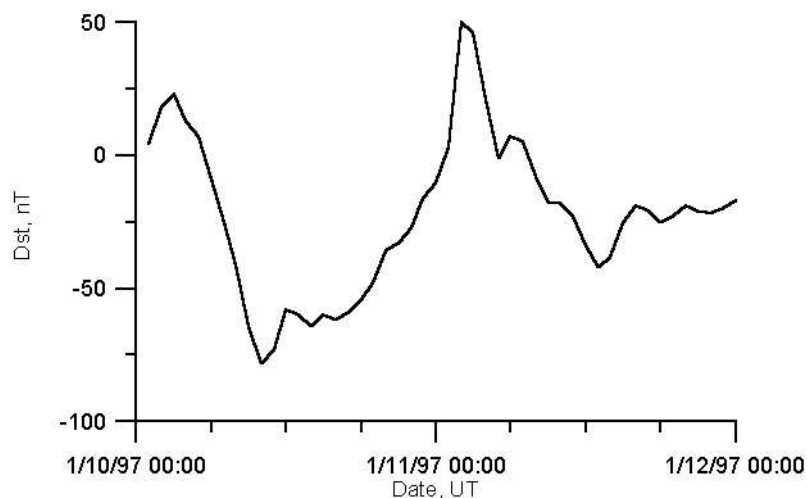


Рис. 6.20: Временной ход глобального индекса геомагнитной активности  $D_{st}$  для интервала прихода магнитного облака 10-11.01.1997 г.

второе уменьшение индекса более слабое. Индекс  $D_{st}$  меняется достаточно медленно, и основная фаза магнитной бури (минимум  $D_{st} \sim -75$  нТ) достигается через  $\sim 5,5$  часов после прихода LE MC или  $\sim 9$  часов после прихода IS. Длительность магнитной бури (по крайней мере до возрастания  $D_{st}$  до положительных значений в начале 11.01) составляет около суток, т.е. сопоставима с длительностью всего MC, и поэтому, строго говоря, магнитную бурю нельзя сопоставить с какой либо структурой MC.

Для описания возмущенности полярной области используются интегральные индексы *Contracted Oval*, *Standard Oval* и *Expanded Oval*, вычисляемые для трех систем станций, расположенных на трех концентрических окружностях вблизи северного магнитного полюса (см. подробнее the Auroral Oval Indices на веб-странице Cluster/Ground-Based Data Center <http://www.wdc.rl.ac.uk/gbdc/ovals/plots/>). Рис. 6.21 и 6.22 показывают эти индексы для магнитного облака 10-11.01.1997 г. Из сравнения Рис. 6.15 и 6.21, 6.22 следует, что провалы в индексах наблюдаются через несколько минут после прихода IS и LE MC. Однако не для всех активаций могут быть найдены изменения ориентации ММП и скачки поля и давления СВ. Это сопоставление вариаций полярных индексов со структурами MC было проведено для всех MC, приведенных в Табл. 6.3.

Табл. 6.4 представляет минимум среднечасовых значений  $D_{st}$  индекса и число активаций полярных индексов, отнесенное к числу структур MC, например, для события 10.01.1997 г. и IS, и LE MC соответствуют активации (обозначено как 1 активация на 1 структуру - 1/1), в то время как TE MC 11.01.1997 г. не соответствует ни одна активация (обозначено как 0/1). Для

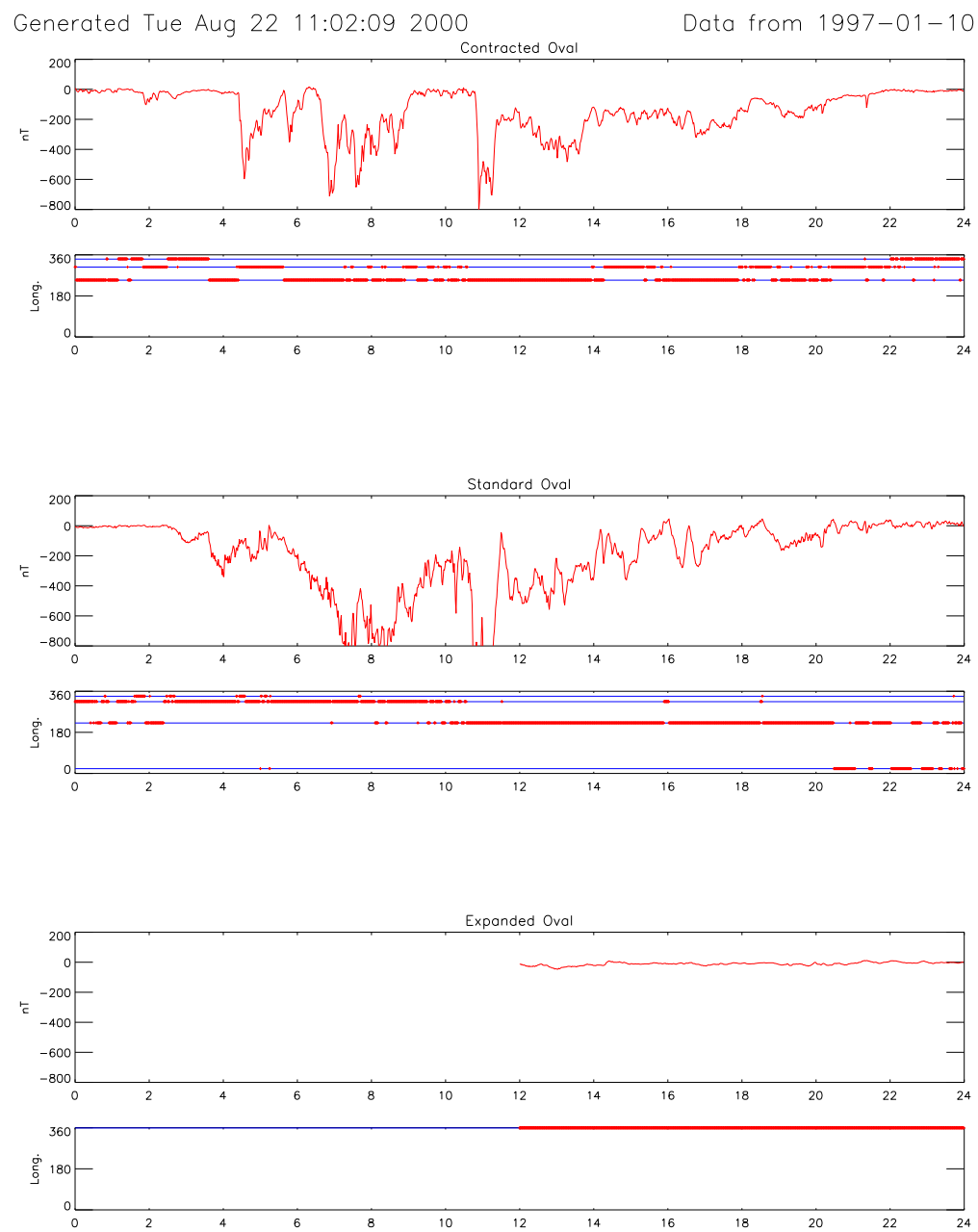


Рис. 6.21: Временной ход авроральных индексов геомагнитной активности *Contracted Oval*, *Standard Oval* и *Expanded Oval* для интервала прихода магнитного облака 10-11.01.1997 г.: Рис 6.21 - для 10.01.1997; Рис 6.22 - для 11.01.1997.

Generated Tue Aug 22 11:02:27 2000

Data from 1997-01-11

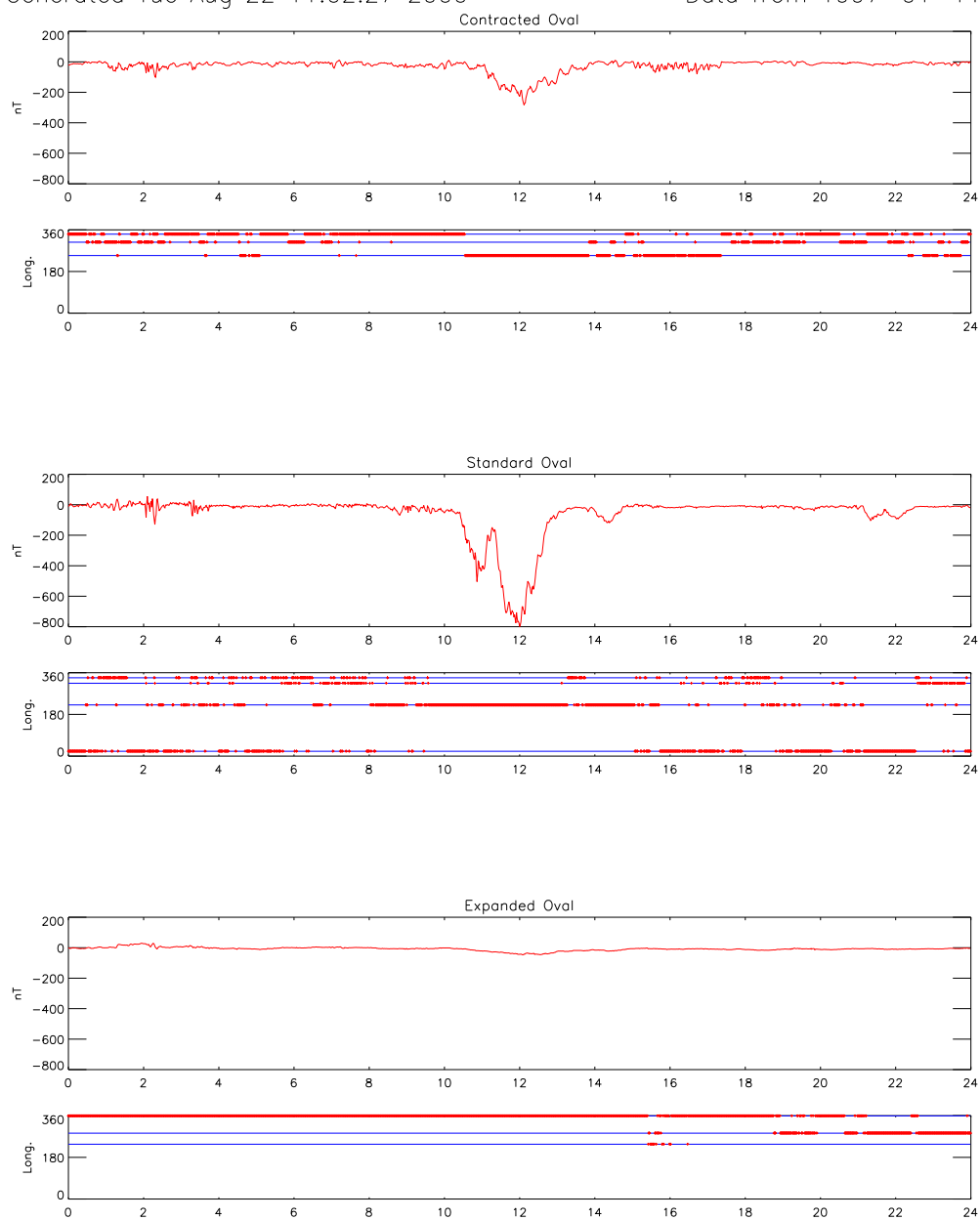


Рис. 6.22: Продолжение Рис. 6.21 для 11.01.1997.



всех МС наблюдались уменьшения  $D_{st}$  индекса. Однако в некоторых случаях (например, 1.09.1997 г. и 24-25.06.1998 г.) индекс указывал на очень слабые магнитные бури или даже их отсутствие (2.06.1998).

Сопоставление активаций со структурой МС показало, что только 185 из 237 активаций (78% от полного числа) может быть связано с IS перед LE МС (IS1), LE, TE, IS перед TE (IS2), знаком  $B_Z$  компоненты ММП ( $B_Z < 0$ ) и величиной скачков поля ( $\Delta B_Z$ ) и динамического давления плазмы солнечного ветра ( $\Delta P$ ); при этом наиболее высокая относительная частота активаций (отношение числа активаций к числу событий данного типа) наблюдается после IS1 и LE. Однако некоторые сильные скачки  $P$  и ММП не привели к активациям, как например, очень большой скачок давления на TE МС 11.01.1997 г. Следует отметить, что этот скачок наблюдался после  $\sim 8$  часов положительной компоненты  $B_Z$  ММП. Отметим также, что событие 10-12.05.1999 г. не вызвало заметных изменений в  $D_{st}$  или полярных индексах (здесь не показано).

Представленные Табл. 6.4 данные о  $D_{st}$  индексе и числе активаций показаны темными кружками на Рис. 6.23 и аппроксимированы сплошной линией. Так как активации могут быть связаны не только с МС, но и с другими причинами, то мы светлыми кружками и штриховой линией приводим зависимость  $N_a$  от  $D_{st}$  для сильных магнитных бурь ( $D_{st} < -90$  нТ). Эта зависимость оказывается близкой к полученной для всех МС, но проходит несколько ниже. Несмотря на большой разброс данных при сравнительно небольшой статистике, можно заметить, что приход МС, вызывающего заметное уменьшение  $D_{st}$ , сопровождается более высоким числом активаций (линейная аппроксимация дает зависимость числа активаций  $N_a = -0,06D_{st} + 1,5$ ). Вопрос о связи медленно изменяющихся глобальных геомагнитных индексов с быстро изменяющимися полярными индексами уже обсуждался в литературе (см. например, сборники [235, 236, ICS4, 1998; ICS5, 2000]), однако наблюдаемая разница зависимости  $N_a$  от  $D_{st}$  для сильных бурь и МС может объясняться тем, что длительность магнитных бурь, как правило, короче длительности МС. Механизмы такой связи в периоды прихода МС могут иметь свои особенности и требуют дальнейших исследований.

### 6.5.3 Положение головной ударной волны и магнитопаузы

Поскольку положение магнитопаузы (magnetopause - MP) определяется балансом давлений плазмы и магнитного поля в солнечном ветре, замедленном и нагретом на головной ударной волне (bow shock - BS), и внутри магнитосферы, то любое изменение условий в межпланетной среде приводит к смещению MP, а следовательно и к смещению BS, для которой MP играет роль препятствия при обтекании солнечным ветром. Положения спутника *ИНТЕРБОЛ-1* в моменты пересечения BS и MP позволяют сопоставить положение BS и MP с условиями в солнечном ветре, определяемых на других КА (*WIND*, *SOHO*, *IMP-8*), и предсказаниями моделей.

Таблица 6.4: Геоэффективность магнитных облаков и их структур

Дата	Dst, nT	Число суббурь и активаций							
		Total	IS1	LE	B <sub>z</sub> jump	B <sub>z</sub> <0	Pjump	IS2	TE
1995									
Aug. 22-23	-61	3	0/1	0/1	3/5	0	0/2	0/0	0/1
Oct. 18-19	-127	9	1/1	1/1	1/1	2	1/3	1/1	0/1
1996									
Dec. 23-25	-33	2	0/1	0/1	0/5	1	1/1	0/0	0/1
1997									
Jan. 10-11	-78	9	0/1	1/1	2/3	2	1/3	0/1	0/1
Feb. 8-11	-68	15	1/1	1/1	2/4	3	3/5	0/0	1/1
Apr. 10-11	-82	4	0/1	1/1	1/2	0	0/0	0/0	1/1
Apr. 21-23	-107	2	1/1	0/1	0/5	0	1/1	0/0	0/0
May 15-16	-115	6	0/1	1/1	2/6	3	0/1	0/0	1/1
June 8-9	-84	5	1/1	0/1	0/5	0	1/6	0/0	0/0
June 19	-36	0	0/1	0/1	0/0	0	0/0	0/0	0/0
July 15-16	-45	4	0/1	1/1	0/0	3	0/0	0/0	0/0
Aug. 3-4	-49	5	0/0	1/1	1/1	0	1/1	0/0	0/1
Sept. 2-3	-98	3	0/1	1/1	0/0	0	1/2	0/0	1/1
Sept. 18-20	-56	5	1/1	0/1	1/3	0	1/3	0/0	1/1
Sept. 21	-24	2	0/1	1/1	0/1	0	0/3	0/0	1/1
Sept. 21-22	-30	2	1/1	1/1	0/0	0	0/1	0/0	0/1
Oct. 1-2	-98	7	1/1	1/1	1/1	0	1/2	0/0	0/1
Oct. 10-12	-130	4	1/1	1/1	1/2	1	0/2	0/0	0/1
Nov. 7-8	-110	6	1/1	1/1	1/3	2	0/1	0/0	0/1
Nov. 22-23	-108	10	1/1	1/1	1/1	6	0/1	0/0	1/1
Dec. 10-11	-60	4	0/1	1/1	1/3	1	0/0	0/0	1/1
Dec. 30-31	-77	5	0/1	1/1	1/1	3	0/0	0/1	0/1
1998									
Jan. 7-8	-83	10	0/1	1/1	4/6	0	0/1	0/0	0/1
Feb. 4-5	-34	2	1/1	0/1	0/0	0	0/6	0/0	0/1
Feb. 17-18	-100	5	0/1	1/1	1/1	1	0/0	1/1	0/1
Mar. 4-5	-36	4	1/1	0/1	2/6	1	0/0	0/0	0/1
May 2-3	-85	12	1/1	1/1	0/3	8	0/1	1/1	0/0
May 4-5	-205	7	1/1	0/1	1/3	1	0/0	0/0	0/1
June 2	-1	1	0/0	1/1	0/1	0	0/0	0/0	0/1
June 24-25	-25	7	0/1	1/1	0/4	5	2/6	0/1	0/1
Sept. 25-26	-207	14	1/1	1/1	1/2	6	0/1	0/0	1/1
Oct. 18-20	-139	9	0/1	1/1	6/10	2	1/2	0/0	0/1
Nov. 7-8	-148	11	0/1	1/1	7/17	2	1/4	0/0	0/0
Nov. 8-10	-148	23	1/1	0/0	10/12	11	1/4	0/0	1/1
Nov. 13-14	-133	20	1/1	1/1	?	?	?	0/0	1/1
Всего	-	237	17/33	25/34	51/117	64	17/65	3/6	8/28
Среднее	-86	7							

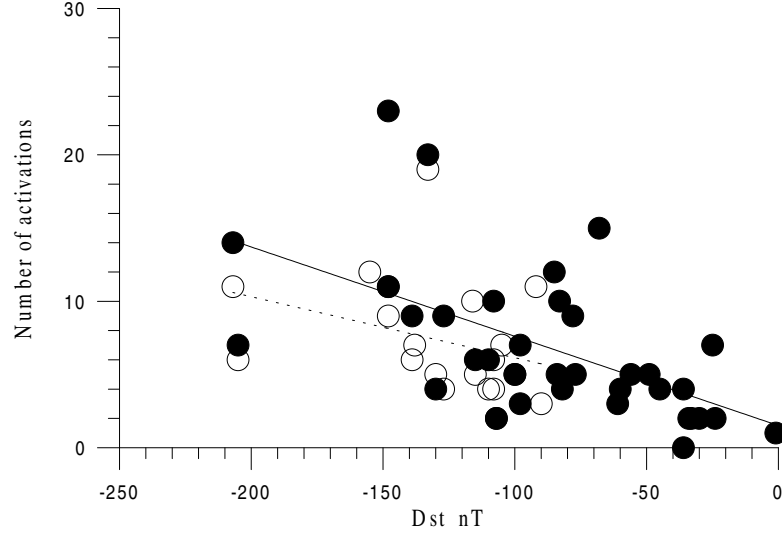


Рис. 6.23: Наблюдаемые значения числа активаций  $N_a$  и минимального значения  $D_{st}$  индекса для периодов прихода магнитных облаков (темные кружки и сплошная линия) и магнитных бурь (светлые кружки и штриховая линия).

Было рассмотрено 44 пересечения МР спутником *ИНТЕРБОЛ-1* в периоды прихода МС. На Рис. 6.24а,б представлены положения этих пересечений в меридиальной плоскости ( $XR_{YZ}$ , где  $R_{YZ} = \sqrt{Y^2 + Z^2}$ ) и поперечном сечении хвоста ( $YZ$ ), а также средние положения МР и BS. Из рисунка видно, что отклонение реального положения МР от среднего (наблюдаемого при давлении СВ  $P \sim 2$  нПа) меняется от 1-2  $R_E$  на дневной стороне MS до 5-7  $R_E$  в области хвоста, при этом реальная МР чаще оказывается расположенной ближе к Земле, чем среднее положение, предсказанное моделью.

Для каждого пересечения МР были определены параметры СВ (давление  $P$  и  $B_Z$  компонента ММП) с учетом времени распространения плазмы между двумя космическими аппаратами. Диапазон изменения этих параметров для рассматриваемых МС оказался достаточно широким:  $0,3 < P < 42$  нПа и  $-21 < B_Z < 21$  нТ. Существующие в настоящее время модели МР [222, 206, 201, 48, 218, Sibeck et al., 1991; Roelof and Sibeck, 1993; Petrinec and Russell, 1996; Кузнецов и Суворова, 1997; Shue et al., 1997]) имеют существенно более узкий диапазон применения. Последняя версия модели МР [219, Shue et al., 1998] была получена с учетом более высоких значений параметров СВ. Поэтому мы провели сравнение реальных положений МР с двумя моделями, и Рис. 6.25 представляет расстояние между измеренным положением и предсказанным в модели Shue et al., 1997 [218] (кружки) и Shue et al., 1998 [219] (ромбы), при этом положительные расстояния соответствуют случаю, когда измеренная граница

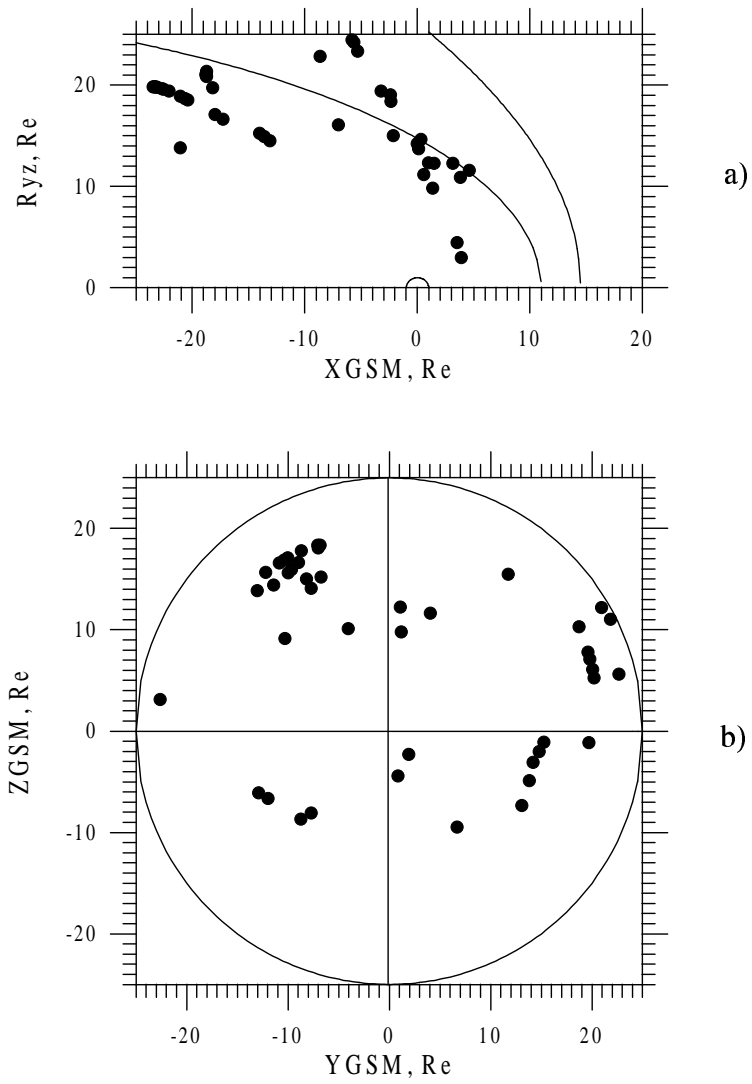


Рис. 6.24: Положения магнитопаузы по наблюдениям на спутнике *ИНТЕРБОЛ-1* во время прихода магнитных облаков: а - в системе координат  $XR_{YZ}$ , б - в системе координат  $YZ$ .

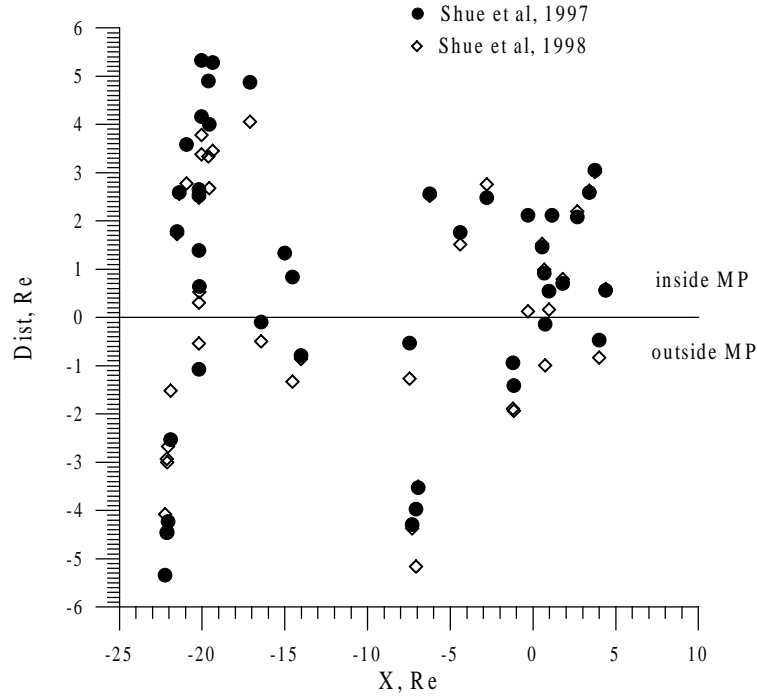


Рис. 6.25: Сравнение измеренных положений магнитопаузы с моделями [218] (кружки) и [219] (ромбы). Положительное расстояние соответствует случаю, когда магнитопауза ближе к Земле, чем предсказано моделью.

находится внутри модельной (т.е. ближе к Земле). Расстояние измерялось вдоль нормали к модельной границе.

Рис. 6.25 наглядно демонстрирует, что обе модели достаточно хорошо предсказывают положение МР в подсолнечной области (при  $X \geq 0$ ) и хуже – в хвосте ( $X < 0$ ): на дневной стороне МР расположена на 1-2  $R_E$  ближе к Земле, а в хвосте разброс составляет от -5 до +2  $R_E$ . Наша статистика не позволяет достаточно надежно количественно сравнить обе модели, однако большой разброс реального положения МР относительно модельного говорит о том, что движение МР во время прихода МС оказывается более сложным, чем предсказывают эмпирические модели, полученные в основном для условий не сильно возмущенного СВ.

В Табл. 6.5 представлены результаты сравнения положения МР с предсказаниями модели Shue et al., 1998 [219], а также BS со средними положениями. Подобных современных моделей головной ударной волны BS, учитывающих условия в межпланетном пространстве, нет, поэтому реальное значение положения BS было сравнено со средним. Можно отметить, что разброс положения BS относительно среднего положения приблизительно такой же, как и МР.

Форма и движение МР для МС 10-11.01.1997 г. изучались в работах [49, 212, Николаева и др., 1998; Safrankova et al., 1998]. Полученные результаты указывают, что изменение размеров магнитосферы сопровождалось более сложными деформациями, чем простое сжатие, когда различные части MS

Таблица 6.5: Положение границ магнитосферы во время прихода магнитных облаков

Дата	Расстояние* ( $R_E$ )	
	между спутником <i>INTERBALL-1</i> и	
	головной ударной волной	магнитопаузой
1995		
Oct. 18	-	-2.4 ... 1.4
Oct. 19	-	-4.4 ... 0.6
1996		
Dec.25	~ 5	
1997		
Jan. 10	-	-0.9 ... 1.4
Jan. 11	-	0.0 ... 1.5
Feb. 8	3	-
Feb. 9	2 ... 3	-
Feb. 10	4	-3.2
Feb. 11	3 ... 6	-
June 9	-5 ... -6	-0.5
July 3	-2 ... -4	-
July 4	2	-
Sept. 03	2	1.0 ... 2.8
Sept. 18	7	-3.5
Sept. 20	7	-
Sept. 21	7	-
1998		
Feb. 3	-	-0.9
Feb. 4	-	-4.7 ... -2.0
Feb. 18	-	1.7
Mar. 4	-3 ... 3	3.5
Mar. 5	3 ... 4	1.0
May 4	0	1.7
* Расстояние > 0, если граница расположена ближе к Земле, чем модельная граница		

одновременно испытывают пропорциональное смещение, - поверхностными волнами на границах и осцилляциями хвоста [253, 49, Yermolaev et al., 1997; Николаева и др., 1998]. На более сложный характер сжатия магнитосферы указывают и наблюдения 18-19.10.1995 г., так как эти данные интерпретировались как результаты пересоединения магнитных силовых линий на МР не в подсолнечной области или вблизи каспа, а в дальнем хвосте на расстояниях  $|X|$  более  $20 R_E$  [214, Savin et al., 1997].

Рис. 6.26 показывает темными ромбиками положение спутников *ИНТЕРБОЛ-1* (*I-1*), *WIND* и *GEOTAIL* (*GE*) 10-12.05.1999, когда они пересекали BS, при этом светлыми ромбиками дано положение BS, предсказанное по модели [105, Fairfield, 1971] для условий в солнечном ветре на момент пересечения BS соответствующим спутником. Кривые представляют результаты расчетов по моделям [231, Spreiter et al., 1966] (кривая 1 для  $P = 0.08$  нПа; 2 - для  $P = 0.50$  нПа) и [105, Fairfield, 1971] (кривая 3 для  $P = 2.0$  нПа). Уменьшение плотности солнечного ветра 10-12.05.1999 г. привело к заметному расширению MS, при этом по данным КА *WIND* BS сместилась наружу настолько, что подсолнечная точка BS в момент минимальной плотности СВ находилась от Земли на расстоянии более, чем  $45 R_E$  при ее среднем положении около  $15 R_E$ . По данным спутника *ИНТЕРБОЛ-1* несколькими часами раньше BS наблюдалась на расстоянии (в пересчете на подсолнечную точку) около  $16 R_E$ . И использованные модели, созданные 3 десятилетия назад, неудовлетворительно описывают положение BS, особенно в условиях очень малой плотности солнечного ветра, и требуют дальнейшего совершенствования.

#### 6.5.4 Некоторые особенности состояния магнитосферы

Как было показано в предыдущем разделе 6.5.3, приход МС к Земле сопровождается смещениями границ MS. Это, в том числе, означает, что на месте, где обычно наблюдается одна физическая область пространства (характеризуемая типичными значениями параметров плазмы и магнитного поля), оказывается совсем другая, в обычных условиях наблюдаемая в другом месте. И хотя небольшие смещения областей (типов) в такой динамической системе, как MS, довольно частое явление, смещения на расстояния сравнимые с размерами областей или даже больше являются очень редкими явлениями, и это необходимо учитывать при сопоставлении параметров, например, обычного магнитослоя с плазмой подобной магнитослою, наблюдаемой в области, где обычно наблюдается плазменный слой. С другой стороны, такой анализ очень важен, так как дает дополнительную информацию о динамике и механизмах формирования различных областей MS. Мы рассмотрели лишь несколько примеров из большого набора различных случаев аномального положения областей MS, и описываемые ниже результаты, частично опубликованные в работах [253, 254, 255, 35, Yermolaev et al., 1997, 1998, 2000a,b], могут рассматриваться лишь как первый шаг, сделанный в этом направлении.

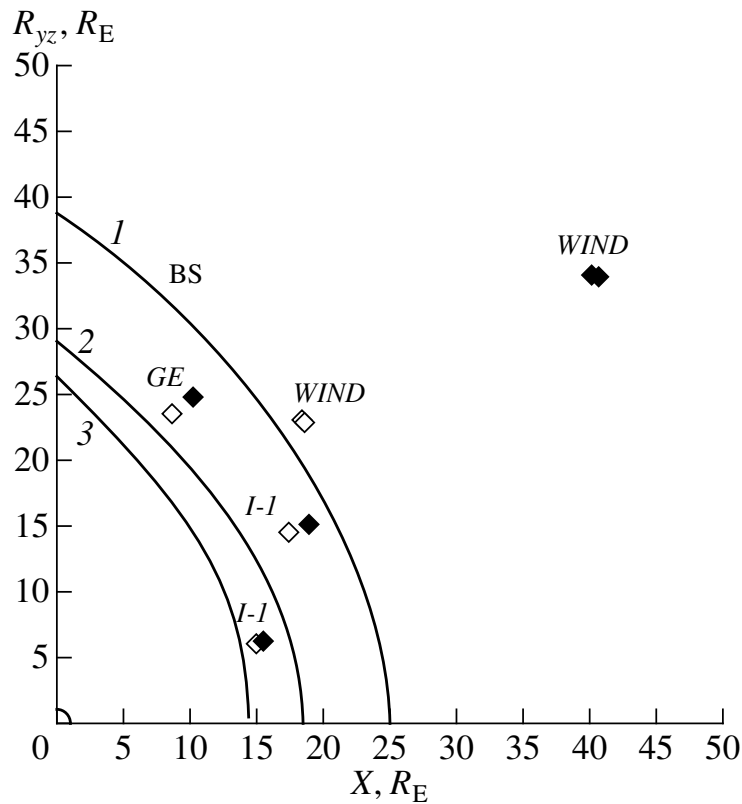


Рис. 6.26: Положение головной ударной волны Земли для интервала прихода солнечного ветра с очень маленькой концентрацией 10-12.05.1999 г. по наблюдениям на КА *ИНТЕРБОЛ-1* (*I-I*), *WIND*, *GEOTAIL* (*GE*) и модельным расчетам [231, 105, Spreiter et al., 1966; Fairfield, 1971] (см. текст).

Рис. 6.27 показывает динамические энергетические спектрограммы ионов (по горизонтальной оси отложено время, по вертикальной – энергия, цветом от синего до красного – возрастающая величина потока ионов) для 3 последовательных витков спутника *ИНТЕРБОЛ-1* в период 5-15.01.1997 г., при этом данные, расположенные на одной вертикальной прямой, были получены приблизительно при одинаковых солнечно-эклиптических координатах спутника (за счет годовой эволюции орбиты спутника относительно оси Солнце-Земля плоскости последовательных орбит оказываются смещенными относительно друг друга на угол  $\sim 4^\circ$ ). Данные представляют собой ионные энерго-спектрограммы, полученные прибором КОРАЛЛ с помощью анализатора, ориентированного перпендикулярно оси вращения спутника (т.е. в плоскости нормальной к солнечно-земной линии).

Верхняя панель, данные для которой были получены до прихода МС, показывает сначала горячую и разреженную плазму плазменного слоя. В интервале 22 UT 6.01 - 02 UT 7.01, когда спутник был вблизи геомагнитного экватора ( $X \sim -17$  и  $Y_{GSM} \sim 16R_E$ ) наблюдалась плазма низко-широтного пограничного слоя (LLBL), после чего спутник начал приближаться к Земле, пересекая несколько раз области плазменной мантии и лобных долей хвоста, и в  $\sim 23$  UT достиг радиационного пояса.

До прихода МС 10.01 наблюдалась плазма плазменного слоя (точнее PSBL - пограничный слой на внешней части плазменного слоя), однако



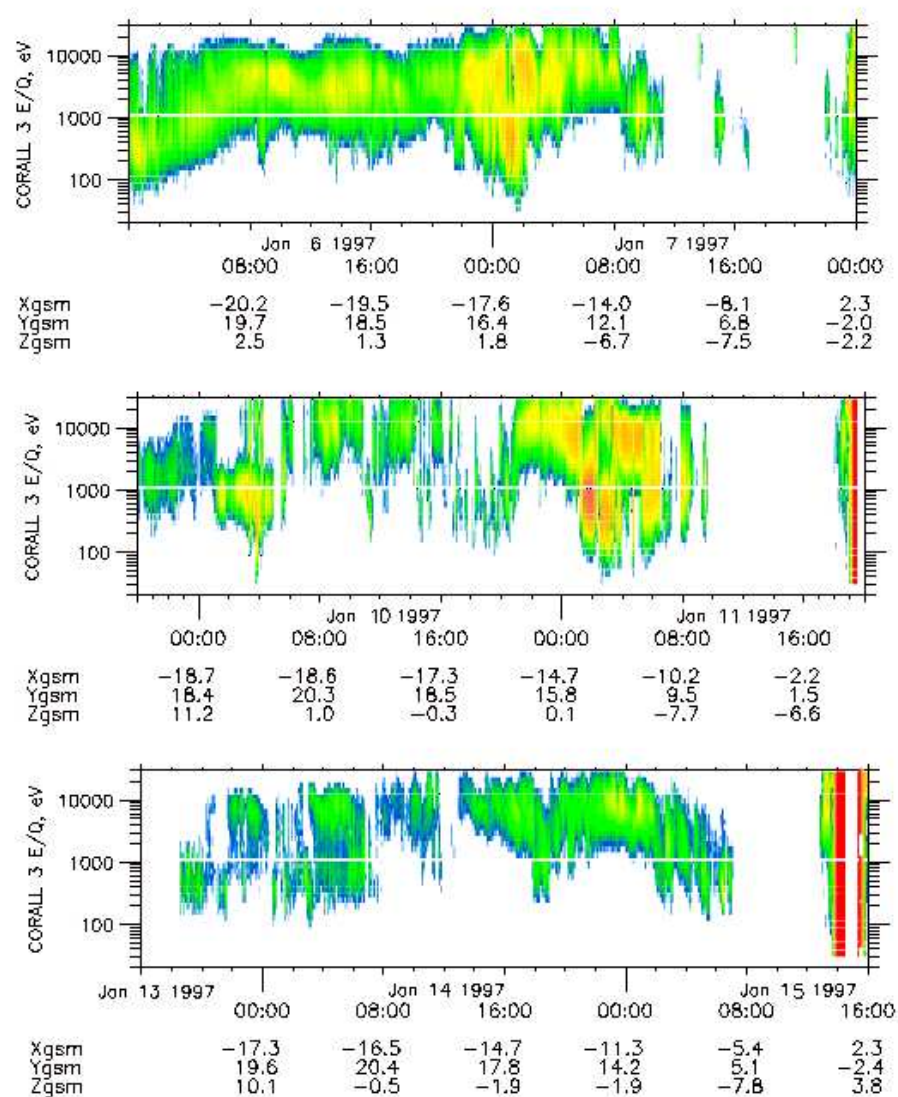


Рис. 6.27: Изменение энергетической спектрограммы ионов во время 3 последовательных витков спутника *ИНТЕРПОЛ-1* 05-15.01.1997 г.

в  $\sim 01.20$  UT спутник пересек МР и оказался в магнитослое, затем с  $\sim 06$  до  $\sim 20$  UT прибор регистрировал как длительные ( $\sim 1-2$  часов) интервалы, так и короткие (несколько минут) всплески плазменного слоя с более низкой плотностью и более высокой энергией, чем на предыдущем витке. Наблюдения плазменного слоя прерывались выходом спутника в лобные доли, что свидетельствует о быстрых движениях геомагнитного хвоста относительно медленно двигающегося спутника. После прихода ТЕ МС в  $\sim 01.20$  UT 11.01 спутник из плазменного слоя также быстро попал в очень плотный и горячий магнитослой, затем в  $\sim 02$  UT - в LLBL (на достаточно большом расстоянии от геомагнитного экватора  $Z_{GSM} \sim 8 - 9R_E$ ) и затем в плазменный слой.

Параметры плазменного слоя, наблюдаемые 13-14.01, имели промежуточные значения между теми, которые наблюдались до прихода МС и во время его прихода, при этом геомагнитный хвост продолжал заметно смещаться относительно спутника.

Динамические энергетические спектрограммы электронов, измеренные с помощью прибора ИОН на последующих витках спутника *ИНТЕРБОЛ-2*, представлены на Рис. 6.28. До прихода МС в полярной шапке (инвариантная широта  $\lambda > 65^\circ$ ) электроны не наблюдаются. Однако после прихода ТЕ МС 11.01.1997 г. в полярной шапке были зарегистрированы большие потоки электронов с энергией в 100-300 эВ. Этот период совпадает с выходом спутника *ИНТЕРБОЛ-1* из плазменного слоя в магнитослой и LLBL, т.е. возмущение дальнего хвоста МС совпало с высыпанием электронов в полярной шапке.

Следовательно необычные черты, наблюдаемые в характеристиках магнитослойной и магнитосферной плазмы во время прихода МС, могут быть в настоящее время суммированы следующим образом.

- Наблюдение очень горячей (например, 10-11.01.1997 г. [253, 254, Yermolaev et al., 1997, 1998]), также как и очень холодной плазмы (19.10.1995 г. [214, Savin et al., 1997]) в магнитослое.

- Очень плотная ( $N \sim 150 \text{ см}^{-3}$ ) плазма в магнитослое [49, Николаева и др., 1998]) и отсутствие прямой корреляции плотностей в магнитослое и в плазменном слое [253, 254, Yermolaev et al., 1997, 1998].

- Наблюдения плазмы типа LLBL на большом расстоянии ( $\sim 8R_E$ ) от геомагнитного экватора [253, 254, Yermolaev et al., 1997, 1998].

- Колебания геомагнитного хвоста относительно спутника, при этом смещения отдельных областей достигают величины характерного размера этой области [253, 254, 255, Yermolaev et al., 1997, 1998, 2000].

- Развитие возмущений и ускорение ионов и электронов в плазменном слое, их последующее вторжение и высыпание в полярных областях магнитосферы [253, 255, Yermolaev et al., 1997, 2000].

- Глобальное уменьшение плотности плазмы в различных областях магнитосферы во время "слабого" солнечного ветра 10-12.05.1999 г..

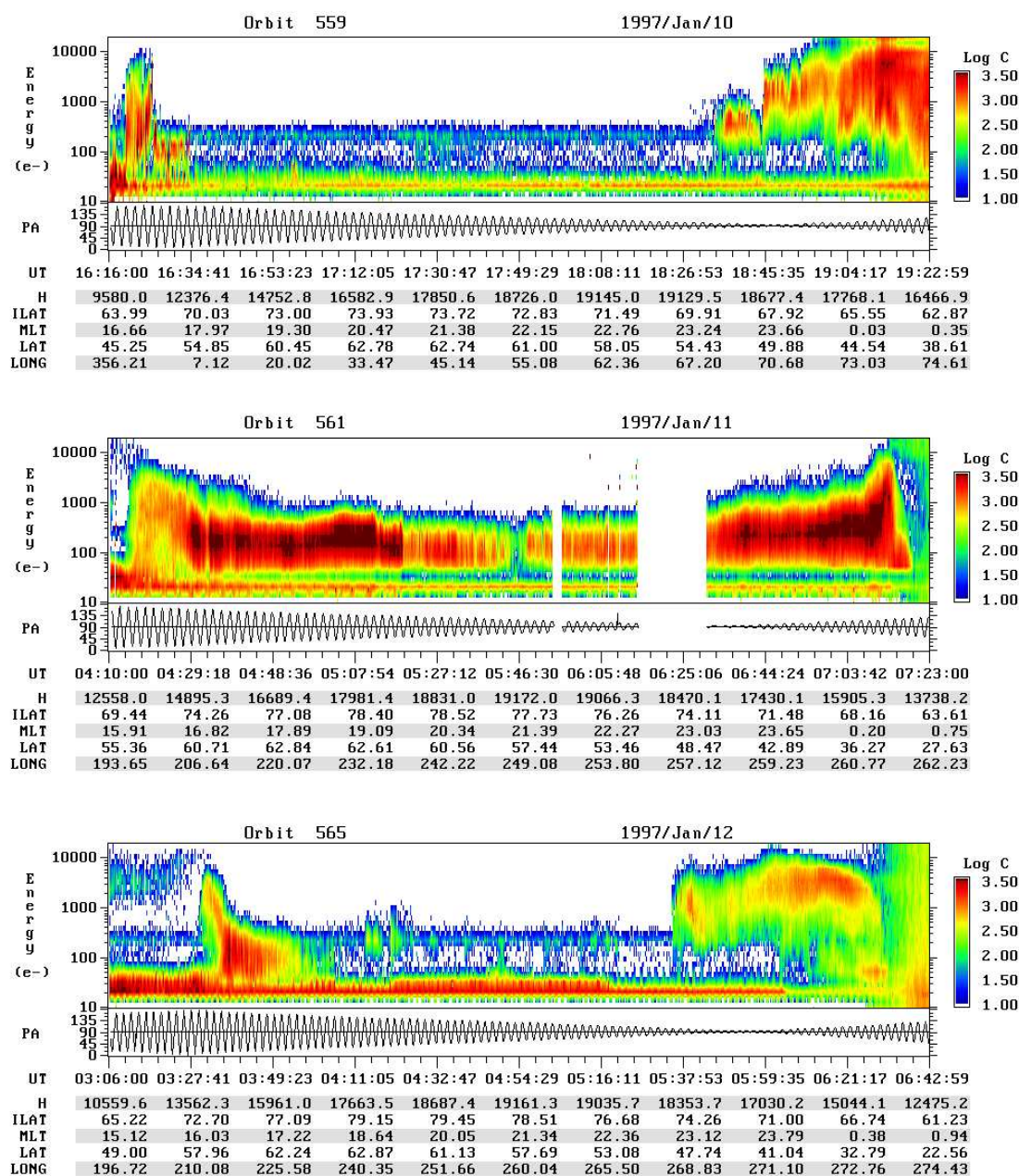


Рис. 6.28: Изменение энергетической спектрограммы электронов во время 3 витков спутника *ИНТЕРБОЛ-2* 10-12.01.1997 г.

## 6.6 Обсуждение результатов и выводы

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 [209], 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.

Рассмотрим подробнее связь между сильными солнечными вспышками и СМЕ, с одной стороны, и средними и сильными магнитными бурями, с другой стороны. Сначала для простоты предположим, что среди возможных и маловероятных вспышек (см. раздел 6.3) число событий, приведших и не приведших к магнитной буре, распределено как 3:1 и 1:3, соответственно. Тогда число геоэффективных и негеоэффективных сильных солнечных вспышек будет 44% и 56%, соответственно. Для опубликованных данных по СМЕ [240, 123, Webb, 1996; Gopalswamy et al., 2000] эти числа, по-видимому, можно считать равными 60% и 40%, т.е. геоэффективность СМЕ на  $\sim 30\%$  выше, чем у вспышек. В то же время наши оценки данных спутника *SOHO* для периода 1996-2000 гг. дают  $\sim 35\%$  и  $\sim 65\%$  для 125 гало-СМЕ и  $\sim 40\%$  и  $\sim 60\%$  для 24 событий из тех же гало-СМЕ, сопровождавшихся солнечными вспышками.

Рассмотрим, насколько эти выводы статистически значимы. Как уже отмечалось выше, период появления средних и сильных магнитных бурь меняется в солнечном цикле от  $\sim 6,8$  суток в возмущенные годы до  $\sim 45$  суток в спокойные годы со средней величиной  $\sim 15$  суток. Так как нас интересуют годы, когда Солнце было достаточно активным, то для дальнейшего анализа можно взять величину 8-10 суток. Так как интервал запаздывания от солнечного события до бури обычно берется длительностью  $\sim 3,5$  суток ("окно" от 1,5 до 5 суток), то можно оценить вероятность наблюдения бури, если и солнечное событие и буря происходят случайным образом как отношение длительности "окна" к среднему периоду между бурями. Эта оценка показывает, что "корреляция" между солнечными и наземными явлениями будет наблюдаться в 35-44% случаев даже при случайном распределении этих явлений. Поэтому 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 (см. Рис. 6.11). Геоэффективность опубликованных данных по СМЕ [240, 123, Webb, 1996; Gopalswamy et al., 2000] выше, в том числе и выше полученного порога для случайных процессов, однако наш анализ данных по гало-СМЕ показывает, что и корреляция между СМЕ и магнитными бурями может иметь случайный характер.

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 селективировать солнечные события по дополнительным признакам, приводящим к отбрасыванию событий, не обладающих достаточной геоэффективностью. Очень перспективным в этом направлении является метод определения ориентации магнитного поля в выброшенной плазме по его исходной конфигурации в солнечной атмосфере [94, Crooker, 2000]. Также важно уметь 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.

В отличие от анализа солнечных источников магнитных бурь, где за основу брались списки событий на Солнце, при анализе межпланетных источников бурь анализировались только интервалы солнечного ветра, соответствующие средним и сильным магнитным бурям. Поэтому смысл понятия "геоэффективное событие" в межпланетной среде несколько отличается от понятия "геоэффективное событие" на Солнце (см. раздел 6.4). Основными типами межпланетных источников средних и сильных магнитных бурь являются MC и CIR, каждый из которых составляет по  $\sim 1/3$  от всех геоэффективных типов СВ, при этом по сравнению со средними бурями доля сильных бурь от MC 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 MC хорошо согласуется с аналогичными данными работы [129, Gosling et al., 1991], хотя, в отличие от данной работы, там MC определялись по двунаправленным потокам электронов, а бури – по  $K_p$  индексу. Определенная нами зависимость доли магнитных бурь, возбужденных MC (также как и CIR), от фазы солнечного цикла имеет два максимума за цикл. При этом кривые для бурь от MC и от CIR изменяются в противофазе, что следовало ожидать, так как сумма долей бурь от MC и от CIR должна быть константой близкой к  $2/3$ , а оставшаяся  $1/3$  составляют другие типы СВ. Этот результат, по-видимому, согласуется с наблюдениями распространенности магнитных бурь от течений типа MC и CIR в СВ, проведенными в 1979-1988 годах на расстоянии 0,7 а.е. на космическом аппарате *PVO* [160, Lindsay et al., 1995], где было получено, что MC более геоэффективны в максимуме, а CIR в минимуме солнечного цикла, если проигнорировать наши результаты (см. Рис. 6.14) в минимуме цикла в 1986-1988 годы. В целом же полученная нами зависимость имеет более сложный характер на протяжении более длинного периода, чем в работе [160, Lindsay et al., 1995].

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 и (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 [51, Петрукович и Климов, 2000].

Представленные результаты анализа взаимодействия магнитных облаков и "слабого" солнечного ветра с земной магнитосферой по данным спутников *ИНТЕРБОЛ-1,2* позволяют сделать несколько выводов об отклике магнитосферы на такого рода воздействия.

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 отсутствие 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 этом около 1/4 магнитосферных возмущений возникает без видимых изменений параметров межпланетной среды;

- при длительной северной ориентации ММП практически все изменения параметров магнитного облака негеоэффективны и не оказывают заметного влияния на состояние магнитосферы и на геомагнитное поле.

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.

Магнитные облака, вызывающие большое число полярных возмущений, включая суббури, как правило сопровождаются более сильными глобальными возмущениями типа магнитных бурь.

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.

Поведение магнитосферы Земли при экстремальных условиях в межпланет-

ной среде, наблюдаемых при приходе магнитных облаков, плохо согласуется с существующими статистическими моделями, недостаточно подробно изучено и требует дальнейших исследований.

# Заключение

В настоящей работе описываются результаты изучения крупномасштабной структуры и динамики солнечного ветра по измерениям на спутниках *Прогноз 7* (ноябрь 1978 г.), *Прогноз 8*, *Прогноз 10* (проект "Интершок") и *Прогнозы 11, 12* (Хвостовой и Авроральный зонды проекта "Интербол"). Полученные результаты были также сопоставлены со структурами и явлениями как в солнечной атмосфере, так и в магнитосфере Земли. Здесь мы кратко суммируем основные выводы.

## 1. Аппаратура, методика измерений и обработки данных

Предложенные физические принципы измерений и технические решения по изготовлению научной аппаратуры, а также методы обработки и анализа результатов измерений (см. главу 2) позволили провести исследование различных параметров солнечного ветра и успешно решить научные задачи, стоявшие перед экспериментами (см. раздел 1.5).

## 2. Средние характеристики солнечного ветра

Благодаря анализу данных о "среднем" солнечном ветре (т.е. без селекции данных по типам течений СВ) 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, получены 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 [101, 13, 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  $\sim -5$  км/с 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 параметра  $X$  от  $\sim -1$  до  $\sim +1$ , для  $0.02 \leq n_\alpha/n_p \leq 0.05$   $T_\alpha/T_p$  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  $X$  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 [134, 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  $10-25 R_0$ , где по результатам радиопросвечивания наблюдается сильная неоднородность параметров плазмы [61, Яковлев и др., 1987], происходит перемешивание разноскоростных течений плазмы с различным относительным содержанием малых ионных составляющих, в результате образуются течения с неравновесными переносными скоростями [101, 13, 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* [165, 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* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34, 43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, 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.

### 3. Крупномасштабная структура солнечного ветра

Результаты селективных измерений параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра, а также межпланетного магнитного поля на спутнике *Прогноз 7*, представленные в виде 4-мерных зависимостей от переносной скорости  $v_p$ , концентрации  $n$ , параметра  $\beta$  и относительного содержания гелия  $n_\alpha/n_p$  солнечного ветра, позволили выделить пять основных различных областей, соответствующих различным типам течений:

- область 1 характеризуется низкой скоростью ( $v_p = 300 - 420 \text{ км/с}$ ) и высокой концентрацией ( $n = 15 - 50 \text{ см}^{-3}$ ), отношением теплового давления к магнитному  $\beta > 1$  и низкими значениями температуры протонов, относительного содержания гелия и модуля магнитного поля,
- область 2 характеризуется также низкой скоростью ( $v_p = 270 - 450 \text{ км/с}$ ) и средней концентрацией ( $n = 2 - 20 \text{ см}^{-3}$ ), значениями  $\beta < 1$ , низкими температурой и относительным содержанием гелия и средним магнитным полем,
- область 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,
- область 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,
- область 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. потоки из областей с замкнутыми линиями коронального магнитного поля (из стримеров - CS),
3. потоки 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 (течение плазмы, содержащее 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 была обнаружена область 6, которая 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.

#### **4. 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. Учитывая длительность и частоту 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. 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  $n$  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 [121, Geiss, 1970] о важной роли основного, протонного, потока солнечного ветра на вытягивание 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  $n$  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.

## **6. 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 энерго-анализа малые ионные составляющие, такие условия выполняются в течениях типа INS(CS), NCDE(HCS) и HAE(CH) 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 инъекцией корональной массы в области стримера.
7. 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.
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 ( $\sim 70$  см $^{-3}$ ).

## 7. 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 [209] 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 (см. Рис. 6.11). Геоэффективность 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 селективировать 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 половину 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 [129, Gosling et al., 1991]. Определенная нами зависимость доли магнитных бурь, возбужденных МС (также 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 [160, 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 и (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 [51, Петрукович и Климов, 2000].

## **8. 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.

### 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 (1) за ударной волной, как изолированной, так и связанной с магнитным облаком или CIR, (2) в области сжатия непосредственно перед телом магнитным облаком и в CIR и (3) 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".

# Литература

- [1] 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., т.22, N 5, с.774, 1984.
- [2] Альвен Г., Фельтхаммар К.-Г. Космическая электродинамика, - М.:Мир, 1967.
- [3] Арцимович Л., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков, - М.:Атомиздат, 1979.
- [4] 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., т.37, N 2, с.143, 1999.
- [5] Боярский М.Н., Застенкер Г. Н., Павлов В.П., Прохоренко В.И., Смирнов В.Н., Шейхет А.И., Эйсмонт Н.А. Динамика движения спутника и моделирование ситуаций в проекте ИНТЕРШОК. - Космич. Исслед., т.24, N 2, с.200, 1986.
- [6] 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 Пр-969, М.: ИКИ АН СССР, 1984.
- [7] Вайсберг О.Л., Журина Л.С., Коваленко В.Г. и др. Многоканальный модульный спектрометр электронов и протонов малых энергий. - Приборы и техника эксперимента, N 6, с.42, 1971.
- [8] Вайсберг О.Л., Горн Л.С., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Захаров Д.С., Зерцалов А.А., Климашов А.А., Леин Э.Л., Лейбов А.В., Омельченко А.Н., Помогаев В.В., Романов С.А., Смирнов В.Н., Стефанович А.Е., Темный В.В., Хазанов Б.И., Шифрин А.В. Эксперимент по диагностике межпланетной и магнитосферной плазмы на АМС "Венера-11,12" и ИСЗ "Прогноз-7". - Космич. Исслед., т.27, N 5, с.780, 1979.

- [9] 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., т.18, N 5, с.761, 1980.
- [10] Вайсберг О.Л., Горн Л.С., Журина Л.С., Захаров Д.С., Климашов А.А., Омельченко А.Н., Ольдекоп Л.Г., Помогаев В.В., Хазанов Б.И., Шифрин А.В. Спектрометр заряженных частиц малой энергии СКС - 04.- Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение, N47, М.:Атомиздат, с.51, 1981.
- [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, с.73, 1984.
- [12] Вайсберг О.Л., Застенкер Г.Н., Смирнов В.Н., Немечек З., Шафранкова Я., Аванов Л.А., Колесникова Е.И. Динамика функции распределения ионов вблизи фронта околоземной ударной волны (И.У.1985 г.).- Космич. Исслед., т.24, N 2, с.166, 1986.
- [13] Веселовский И.С. Об эволюции сильных неоднородностей в плазме солнечного ветра. - Геомагнетизм и Аэрономия, т.18, N1, с.3, 1978.
- [14] Веселовский И.С. Физика межпланетной плазмы. - Итоги науки и техники. Исследование космического пространства, М.:ВИНИТИ, т. 22, 1984.
- [15] Гаврилова Е.А., Ерошенко Е.Г., Стяжкин В.А., Эйсмонт Н.А., Данов К., Петров П. Визуализация магнитных измерений на спутнике "Прогноз-7". - Препринт Пр-1064, М.:ИКИ АН СССР, 1986.
- [16] Гальперин Ю.И., Горн Л.С., Хазанов Б.И. Измерение радиации в космосе, М.: Атомиздат, 1972.
- [17] Гартманов В.Н., Коган В.Т., Кошевенко Б.В., Павлов А.К. Масс-спектрометр. - Авторское свидетельство СССР N 1061193, бюлл. N 46, 1983.
- [18] Гартманов В.Н., Коган В.Т., Кошевенко Б.В., Павлов А.К., Харченко А.А., Чичагов Ю.В. Масс-спектрометры для исследования состава солнечного ветра. - Научное космическое приборостроение, N 4, М.:Металлургия, с.63, 1985.
- [19] Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д., Рыбчинский Р.Е. Изучение межпланетного ионизационного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трехэлектродных

ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете. Докл. АН СССР, т.131, № 6, с.1301, 1960.

- [20] Гурин Л.С., Застенкер Г.Н., Мокров В.С., Хохлов М.З. Некоторые особенности изучения потоков заряженных частиц с помощью ловушек и анализаторов. III. Определение параметров солнечного ветра по энергетическим спектрам. - Космич. Исслед., т.13, N 4, с.555, 1975.
- [21] Ермолаев Ю.И. Поведение кинетических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц в зависимости от скорости солнечного ветра. - Космич. Исслед., т.24, N 5, с.725, 1986.
- [22] Ермолаев Ю.И. Крупномасштабные характеристики ионной компоненты солнечного ветра по результатам наблюдений на космических аппаратах. - Препринт Пр-1281, М.:ИКИ АН СССР, 1987.
- [23] Ермолаев Ю.И. Экспериментальное изучение малых составляющих ионной компоненты солнечного ветра, дисс. на соискание степени к.ф.-м.н., ИКИ АН СССР, 1988.
- [24] Ермолаев Ю.И. Новый подход к изучению крупномасштабной структуры солнечной короны по измерениям параметров солнечного ветра. - Космич. Исслед., т.28, N6, с.89, 1990.
- [25] Ермолаев Ю.И. Наблюдения ионов  $^4\text{He}^{++}$  в солнечном ветре. - Космич. Исслед., т.32, N1, с.93-125, 1994.
- [26] Ермолаев Ю.И. Скорости и температуры протонов и альфа-частиц в разных типах течений солнечного ветра. - Космич. Исслед., т.33, N 4, с.381, 1995.
- [27] Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976-2000 гг. Космич. Исслед., т.40, N1, 2002.
- [28] Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н. Динамика потоков тяжелых ионов солнечного ветра и некоторых характеристик солнечной короны. - Космич. Исслед., т.28, N 1, с.103, 1990.
- [29] Ермолаев Ю.И., Ступин В.В. Связь относительного содержания гелия с условиями в солнечном ветре по измерениям на спутнике "Прогноз-7". - Космич. Исслед., т.28, N 4, с.571, 1990.
- [30] 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., т.30, N 6, с.833, 1992.

- [31] Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Коган В.Т., Кочаров Г.Е., Кошевенко Б.В., Лейбов А.В., Немечек З., Павлов А.К., Федоров А.О., Харченко А.А., Чичагов Ю.В., Шафранкова Я. Эксперимент по определению ионного состава солнечного ветра с помощью масс-энергоанализаторов комплекса БИФРАМ.- Космич. Исслед., т.24, N 2, с.192, 1986.
- [32] Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н., Ведерникова Т.И., Омельченко А.Н., Хамитов Г.П., Колесников В.М. Вариации гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра по данным селективных измерений на спутнике "Прогноз - 7". - Препринт ПР-1357, М.:ИКИ АН СССР, 1988.
- [33] Ермолаев Ю.И., Журавлев В.И., Застенкер Г.Н. и др. Наблюдения однократно ионизованного гелия в солнечном ветре, - Космич. Исслед., т.27, N5, с.717, 1989.
- [34] Ермолаев Ю.И., Ступин В.В., Застенкер Г.Н., Хамитов Г.П., Козак И. Вариации гидродинамических параметров протонов и  $\alpha$ -частиц солнечного ветра по измерениям на спутнике Прогноз-7. - Космич. Исслед., т.28, N 2, с.218- 225, 1990.
- [35] Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н., Николаева Н.С. Реакция магнитосферы Земли на события в солнечном ветре по данным проекта ИНТЕРБОЛ. - Космич. Исслед., т.38, N 6, с.563-576, 2000.
- [36] Застенкер Г.Н., Денин А.Б., Ермолаев Ю.И., Журина Л.С., Климашов А.А., Леин Э.Л., Стефанович А.Е., Хазанов Б.И., Шифрин А.В. Интегральный детектор заряженных частиц малой энергии. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение, N 47, М.:Атомиздат, с.64, 1981.
- [37] Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Пинтер С., Немечек З., Шафранкова Я., Беликова А.Б., Лейбов А.В., Прохоренко В.И., Стефанович А.Е., Бедриков А.Г., Каримов В.Т. Наблюдения солнечного ветра с высоким временным разрешением. - Космич. Исслед., т.20, N 6, с.900, 1982.
- [38] Застенкер Г.Н., Лейбов А.В., Ермолаев Ю.И., Наместник С.Г., Орлов В.Г., Бедриков А.Г., Немечек З., Шафранкова Я. Устройство относительной калибровки электростатических анализаторов. Авторское свидетельство СССР N 1032934, бюлл. N 45, с.295, 1985.
- [39] Застенкер Г.Н., Вайсберг О.Л., Немечек З., Шафранкова Я., Федоров А.О., Ермолаев Ю.И., Лейбов А.В., Рихтер М., Ганзал В., Бородкова Н.Л., Скальский А.А., Смирнов В.Н., Гаврилова Е.А., Плюснина Н.В., Омельченко А.Н. Изучение тонкой структуры ударных волн с помощью

комплекса плазменных спектрометров БИФРАМ. - Космич. Исслед., т.24, N 2, с.151, 1986.

- [40] Зерцалов А.А., Боске Ж.М., Дюстон К. и др. Некоторые результаты измерений  $\alpha$ -компоненты солнечного ветра на спутнике "Прогноз". - Космич. Исслед., т.14, N 3, с.463, 1976.
- [41] Зерцалов А.А., Вайсберг О.Л., Темный В.В. Характеристики протонной и  $\alpha$ -компонент солнечного ветра после прохождения межпланетных ударных волн по наблюдению на спутнике "Прогноз" 15 и 30.V.1972 г. - Космич. Исслед., т.14, N 2, с.257, 1976.
- [42] Иванов К.Г. Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли, - Геомагнетизм и аэрономия, т.36, No.2, 195, 1996.
- [43] Карачевский В.Н., Кульков С.Д., Нариманов Г.С., Овсиенко Ф.М. Автоматическая станция "Прогноз". - Исследование солнечной активности и космическая система "Прогноз", М.:Наука, 206 с., 1984.
- [44] Карманов В.Г. Математическое программирование. - М.:Наука, 148 с., 1975.
- [45] Климашов А.А., Коваленко В.Г. Узел детектирования ионов с использованием селектора скоростей. - Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение, N 24, М.:Атомиздат, с.47, 1974.
- [46] Коваленко В.А. Солнечный ветер. - М.:Наука, 1983
- [47] Кочаров Г.Е., Гартманов В.Н., Коган В.Т., Кошевенко Б.В., Павлов А.К., Харченко А.А., Чичагов Ю.В. Эксперимент по определению ионного состава солнечного ветра. - Энергичные частицы и фотоны солнечных вспышек, Л.: Изд-во ЛИЯФ, с.104, 1984.
- [48] Кузнецов С.Н., Суворова А.Н. Форма магнитопаузы вблизи геостационарной орбиты, - Геомагнетизм и аэрономия, т.37, N 3, с.1, 1997.
- [49] Николаева Н.С., Застенкер Г.Н., Ноздрачев М.Н. и др. Анализ положений и движений магнитопаузы во время прихода к Земле магнитного облака 10 и 11 января 1997 г., - Космич. Исслед., т.36, N 6, с.564, 1998.
- [50] Омельченко А.Н. Плазменные процессы в пограничных областях геомагнитосферы. - Диссертация на соискание ученой степени к. ф.-м. н., М.:ИКИ АН СССР, 1987.
- [51] Петрукович А.А., Климов С.И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности, - Космич. Исслед. т.38, N 5, с.463, 2000.

- [52] Потоки энергии Солнца и его изменения, под ред. О.Уайта, М.:Мир, 1977.
- [53] Прохоренко В.И. Ситуационный анализ орбит станций "Прогноз". - Исследование солнечной активности и космическая система "Прогноз", М.:Наука, 214 с., 1984.
- [54] Романов С.А. Влияние характеристик анализаторов заряженных частиц на результаты измерений параметров солнечного ветра. - Препринт Пр-211, М.:ИКИ АН СССР, 1975.
- [55] Стефанович А.Е., Эйсмонт Н.А. Система определения ориентации станции "Прогноз". - Исследование солнечной активности и космическая система "Прогноз", М.:Наука, с.211, 1984.
- [56] "Труды конференции по физике солнечно-земных связей, Иркутск, 24-29 сентября 2001 г.", ("Солнечно-земная физика", Вып. 2 (115), Иркутск 2002).
- [57] Усманов А.В. Магнитогидродинамические модели солнечного ветра. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н., Санкт-Петербург, 1999
- [58] Чашей И.В. О формировании короны и быстрых потоков солнечного ветра над корональными дырами, - Геомагнетизм и аэрономия, т.28, 190, 1988
- [59] 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 Пр-1332, Л.: ФТИ им.А.Ф.Иоффе АН СССР, 1988.
- [60] Шкловский И.С. Звезды. Их рождение, жизнь и смерть. М.:Наука, 1977.
- [61] 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., N 25, с.251, 1987.
- [62] Akasofu S.-J. The development of the auroral substorm, - Planet.Space Sci., N 12, с.273, 1964.
- [63] Allen J.W., Dupree A.K. Calculation of the ionization equilibria for oxygen, neon, silicon and iron. - Astrophys.J., N 155, p.27, 1969.
- [64] Alloucherie Y. Diffusion of heavy ions in the solar corona, - J.Geophys.Res., N 75, p.6899, 1970.



- [65] Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C., Montgomery M.D. Helium and hydrogen velocity differences in the solar wind. - J.Geophys.Res., v.81, N 16, p.2719, 1976.
- [66] Auer H.-D., Rosenbauer H. Evidence of extended solar wind heating by hydromagnetic waves, - J.Geophys.Res., N 82, p.1503, 1977.
- [67] Avanov L., Leibov A., Nemecek Z., Safrankova J., Vaisberg O., Yermolaev Yu., Zastenker G. Fast measurements of solar wind parameters by the MONITOR instrument.- INTERSHOCK Project, Publ.of Astronom.Inst.of Czechoslovak Academy of Sciences, N 60, p.39, 1985.
- [68] Avanov L., Borodkova N., Nemecek Z., Omeltchenko A., Safrankova J., Skalski A., Yermolaev Yu., Zastenker G. Some features of solar wind protons,  $\alpha$ - particles and heavy ions behaviour: the Prognoz 7 and Prognoz 8 experimental results.- Czechoslovak J.Phys., v.37, N 6, p.759, 1987.
- [69] Bame S.J., Hundhausen A.J., Asbridge J.R., Strong I.B. Solar wind ion composition. - Phys.Rev.Lett., N 20, p.393, 1968.
- [70] Bame S.J., Asbridge J.R., Hundhausen A.J., Strong I.B. Solar wind and magnetosheath observations during the January 13-14, 1967, geomagnetic storm.- J.Geophys.Res., 73, 5761, 1968
- [71] Bame S.J., Asbridge J.R., Hundhausen A.J., Montgomery M.D. Solar wind ions:  $^{56}\text{Fe}^{+8}$  to  $^{56}\text{Fe}^{+12}$ ,  $^{28}\text{Si}^{+7}$ ,  $^{28}\text{Si}^{+8}$ ,  $^{28}\text{Si}^{+9}$  and  $^{16}\text{O}^{+6}$ .- J.Geophys.Res., v.75, N 31, p.6360, 1970.
- [72] Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Kearney P.D. The quiet corona: temperature and temperature gradient, - Solar Phys., N35, p.137, 1974.
- [73] Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Montgomery M.D., Kearney P.D. Solar wind heavy ion abundances.- Solar Phys., N 43, p.463, 1975.
- [74] Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Gosling J.T. Evidence for a structure-free state at high solar wind speeds.- J.Geophys.Res., v.82, N 10, p.1487, 1977.
- [75] Bame S.J., Asbridge J.R., Feldman W.C., Fenimore E.E., Gosling J.T. Solar wind heavy ions from flare-heated coronal plasma. - Solar Phys., N 62, p.179, 1979.
- [76] Bedrikov A., Belikova A., Fedorov A., Fuka V., Hanzal V., Kuzmin V., Namestnik S., Nemecek Z., Notkin V., Richter M., Safrankova J., Vaisberg O., Yermolaev Yu., Zastenker G. Complex of plasma spectrometers BIFRAM.- INTERSHOCK Project, Publ.of Astronom.Inst.of Czechoslovak Academy of Sciences, N 60, p.113, 1985.

- [77] Belcher J.W. Alfvénic wave pressure and the solar wind, - *Astrophys.J.*, N 168, p.509, 1971.
- [78] Belcher J.W., Davis L.J. Large-amplitude Alfvén waves in the interplanetary medium, 2. - *J.Geophys.Res.*, N 76, p.3534, 1971.
- [79] Blum P.W., Fahr H.J. Interaction between interstellar helium and the solar wind, - *Astron. and Astrophys.*, N 4, p.280, 1970.
- [80] Bochsler P. Solar wind ion composition. - *Physica Scripta*, v.18, p.55, 1987.
- [81] Bochsler P., Geiss J., Kunz S. Abundances of carbon, oxygen, and neon in the solar wind during the period from August 1978 to June 1982.- *Solar Phys.*, N 103, p.177, 1986.
- [82] Bollea D., Formisano V., Hedgecock P.C., Moreno G., Palmiotto F. - *Proc. Solar Wind Conference, Asilomar, NASA SP-308*, p.588, 1972.
- [83] Boltenkov B.S., Gartmanov V.N., Kocharov G.E. et al. Measurement of the isotopic composition of particle fluxes carried out on spacecraft Soyuz, Zond 8 and Luna 16, - *Space Res.*, N 12, p.1487, 1972.
- [84] Bonetti A., Bridge H.S., Lazarus A., Rossi B., Scherb F., Explorer 10 plasma measurements, - *J.Geophys.Res.*, v.68, p.4017, 1963.
- [85] Borrini G., Gosling J.T., Bame S.J., et al., Solar wind helium and hydrogen structure near the heliospheric current sheet: a signal of coronal streamers at 1 AU. - *J.Geophys.Res.*, v.86, N 6, p.4554, 1981.
- [86] Bosqued J.M., D'Uston C., Zertsalov A.A., Vaisberg O.L. Study of alpha component dynamics in the solar wind using Prognoz satellite. - *Solar Phys.*, v.51, p.231, 1977.
- [87] Burgi A., Geiss J. Helium and minor ions in the corona and solar wind: dynamics and charge states. - *Solar Phys.*, v.103, p.347, 1986.
- [88] Burlaga L.F., Ogilvie K.W. Heating of the solar wind, - *Astrophys.J.*, v.159, N 2, p.659, 1970.
- [89] Burlaga L.F., Ogilvie K.W. Magnetic and thermal pressures in the solar wind. - *Solar Phys.*, v.15, N 1, p.61, 1970.
- [90] Burlaga L.F., Ogilvie K.W. Solar wind temperature and speed, - *J.Geophys.Res.*, v.78, N 13, p.2028, 1973.
- [91] Burlaga L., Fitzenreiter R., Lepping R., et al., A magnetic cloud containing prominence material: January 1997, - *J.Geophys.Res.*, v.103. p.277, 1998.

- [92] Cattaneo M.B., Formisano V., Moreno G., Palmiotto F., Palutan F., Saraceno P. Observation of solar wind heavy ions. - *Solar Phys.*, N 17, p.468, 1971.
- [93] Chang S.C., Hollweg J.V. Alfvénic acceleration of solar wind helium, 2. Model calculation, - *J.Geophys.Res.*, N 81, p.1659, 1976.
- [94] Crooker N. U. Solar and heliospheric geoeffective disturbances, - *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.62, p.1071, 2000.
- [95] Delache P. Contribution a l'étude de la zone transition chromosphere-couronne, - *Ann.d'Astronphys.*, v.30, p.827, 1967.
- [96] Diodato L., Moreno G., Signorini C., Ogilvie K.W. Long-time variations of solar wind proton parameters, - *J.Geophys.Res.*, v.79, p.5095, 1974.
- [97] Eselevich V.G. Relationships of quasi-stationary solar wind flows with their sources on the Sun, - *Solar Physics*, 137, 179-197, 1992.
- [98] Eselevich V.G., Fainshtein V .G. Influence of sunspot magnetic fields upon the velocity of plasma outflow from coronal holes. - *Planet.Space Sci.*, v.37, N 9, p.1027, 1989.
- [99] Eselevich V.G., Fillipov M.A. An investigation of the heliospheric current sheet (HCS) structure. - *Planet.Space Sci.*, v.36, N 1, p.105, 1988.
- [100] Eyni M., Steinitz R. New evaluation of spacecraft solar wind plasma data. - *Proc.COSPAR Symposium B*, ed. Shea M.A., Smart D.F., Wu S.T., Tel Aviv-1977, p.101, 1977.
- [101] 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, 1977.
- [102] Eyni M., Steinitz R. The cooling of solar wind protons from Mariner 2 data. - *J.Geophys.Res.*, v.83, p.215, 1978.
- [103] Eyni M., Steinitz R. Cooling of solar wind protons from the Helios 1 experiment. - *J.Geophys.Res.*, v.83, p.4387, 1978.
- [104] Eyni M., Steinitz R. Global properties of solar wind.2. Empirical proton temperature gradient and their dependence on flow velocity, - *Astrophys.J.*, v.243, N 1, p.279, 1981.
- [105] Fairfield D.H. Average and unusual location of the Earth's magnetopause and bow shock, - *J.Geophys.Res.*, v. 76, p.6700, 1971.
- [106] Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J. The solar wind  $He^{2+}$  to  $H^{+}$  temperature ratio. - *J.Geophys.Res.*, v.79, p.2319, 1974.

- [107] Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J., Gosling J.T. Plasma and magnetic field from Sun, - In: The solar output and its variations, ed. O.R.White, Boulder: Colorado Associated University Press, p.351, 1977.
- [108] Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J., Gosling J.T. Longterm variations of selected solar wind properties: IMP 6,7 and 8 results.- J.Geophys.Res., v.83, N 5, p.2177, 1978.
- [109] Feldman W.C., Asbridge J.R., Bame S.J., et al. The solar origins of solar wind interstream flows: near-equatorial coronal streamers.- J.Geophys.Res., v.86, N 7, p.5408, 1981
- [110] Fenimore E. E. Solar wind flows associated with hot heavy ions, - Astrophys.J., v. 235, N 1, p.245, 1980.
- [111] Feynman J. On solar wind helium and heavy ions temperatures. - Solar Phys., 43, N 1, p.249, 1975.
- [112] Feynman J. Solar cycle and long term changes in the solar wind. - Rev.Geophys.Space Phys., v.21, p.338, 1983.
- [113] Formisano V., Moreno G. Helium and heavy ions in the solar wind. Revista del Nuovo Cimento, v.1, p.365, 1971.
- [114] Formisano V., Palmiotto F., Moreno G.  $\alpha$ -particle observations in the solar wind. - Solar Phys., v.15, N 2, p.479, 1970.
- [115] Formisano V., Moreno G., Amata E. Relationship among the interplanetary plasma parameters: Heos 1, December 1968 to December 1969, - J.Geophys.Res., v.79, p.5109, 1974.
- [116] Galvin A.B., Ipavich F.M., Gloecker G., Hovestadt D., Klecker B., Scholer M. Solar wind ionization temperatures inferred from the charge state composition of diffuse particle events.- J.Geophys.Res., v.89, N 5, p.2655, 1984.
- [117] Geiss J. Elemental and isotopic abundances in the solar wind. - Solar Wind, NASA SP-308, p.559, 1972.
- [118] Geiss J. Processes affecting abundances in the solar wind. - Space Sci.Rev., v.33, p.201, 1982.
- [119] 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.
- [120] Geiss J., Eberhardt P., Buhler F. et al. Apollo 11 and 12 solar-wind composition experiments: fluxes of He and Ne isotopes. - J.Geophys.Res., v.75, p.5972, 1970.

- [121] Geiss J., Hirt P., Leutwyler H. On acceleration and motion of ions in corona and solar wind, - Solar Phys., N 12, p.458, 1970.
- [122] Gibson E.G. - The quiet Sun. Washington, 1973.
- [123] Gopalswamy N., Lara A., Lepping R.P. et al. Interplanetary acceleration of coronal mass ejections, - Geophys.Res.Lett. v. 27, p.145, 2000.
- [124] Gosling, J. T., Pizzo V. J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three-dimensional structure, - Space Sci. Rev., v.89, p.21, 1999.
- [125] Gosling G.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C. Solar wind stream interfaces. - J.Geophys.Res., v.83, p.1401, 1978.
- [126] Gosling J.T., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C., Zwickl R.D. Observations of large fluxes of  $He^+$  in solar wind following an interplanetary shock.- J.Geophys.Res., v.85, p.3431, 1980.
- [127] Gosling J.T., Borrini G., Asbridge J.R., et al. Coronal streamers in the solar wind at 1 AU. - J.Geophys.Res., v.86, N 7, p.5438, 1981.
- [128] Gosling J.T., Baker D.N., Bame S.J., Feldman W.C., Zwickl R.D., Smith E.J. Bidirectional solar wind electron heat flux events, - J.Geophys.Res., v.92, p.8519, 1987.
- [129] 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., v.96, p.7831, 1991.
- [130] Gringauz K.I. Some results of experiments in interplanetary space by means of charged particle traps on Soviet space probe, - Space Research 2, Amsterdam, North-Holland Publ.Co., p.539, 1963.
- [131] Grunwaldt H. Solar wind composition from Heos-2. - Space Res., v.16, p.681, 1976.
- [132] Grunwaldt H., Rosenbauer H. Study of helium and hydrogen velocity differences as derived from Heos 2 S-210 solar wind measurements, - Pleins Feux sur la Physique Solaire, Editions CNRS, p.377, 1978.
- [133] Hartle R.E., Sturrock P.A. Two fluid model of the solar wind, - Astrophys.J., v.151, p.1155, 1968.
- [134] Hernandez R., Marsch E. Collisional time scales for temperature and velocity exchange between drifting Maxwellians, - J.Geophys.Res., v.90, N 11, p.11062, 1985.

- [135] Hirshberg J., Alksne A., Colburn D.S., Bame S.J., Hundhausen A.J. Observation of a solar flare induced interplanetary shock and helium-enriched driver gas, - J.Geophys.Res., v.75, p.1, 1970.
- [136] Hirshberg J., Bame S.J., Robbins D.E. Solar flares and solar wind helium enrichments: July 1965-July 1967. - Solar Phys., v.23, N 2, p.467, 1972.
- [137] Hirshberg J., Asbridge J.R., Robbins D.E. Velocity and flux dependence of the solar wind abundance,- J.Geophys.Res., v.77, p.3583, 1972.
- [138] Hirshberg J., Asbridge J.R., Robbins D.E. The helium component of solar wind velocity streams. - J.Geophys.Res., v.79, N 7, p.934, 1974.
- [139] Hollweg J.V. Alfvenic acceleration of solar wind helium and related phenomena, 1. Theory, - J.Geophys.Res., v.79, p.1357, 1974.
- [140] Hollweg J.V. Some physical processes in the solar wind, - Rev.Geophys.Space Phys., 16, N 4, 689, 1978
- [141] Hollweg J.V., Turner J.M. Acceleration of solar wind  $He^{++}$ , 3. Effects of resonant and nonresonant interactions with transverse waves, - J.Geophys.Res., v.83, p.97, 1978.
- [142] Holzer T.E., Axford W.I. Solar wind ion compositions, - J.Geophys.Res., v.75, N 31, p.6354, 1970.
- [143] Holzer T.E., Axford W.I. Intereaction between interstellar helium and the solar wind, - J.Geophys.Res., N76, p.6965, 1971.
- [144] Hundhausen A.J. Solar wind and coronal expansion, - N.Y.: Springer, 1972.
- [145] Hundhausen A.J. Nonlinear model of high-speed solar wind streams, - J.Geophys.Res., v.78, p.1528, 1973.
- [146] Hundhausen A.J., Asbridge J.R., Bame S.J., Gilbert H.E., Strong I.B. Vela 3 satellite observations of solar wind ions: a preliminary report, - J.Geophys.Res., v.72, p.87, 1967.
- [147] Hundhausen A.J., Gilbert H.E., Bame S.J. Ionization state of interplanetary plasma, - J.Geophys.Res., v.73, p.5485, 1968.
- [148] Jokipii J.R. Effects of diffusion on the composition of the solar corona and the solar wind, California Institute of Technology Thesis, 1965.
- [149] Jokipii J.R. Effects of diffusion on the composition of the solar corona and the solar wind, - In: The Solar Wind, New York, 215 p., 1966.

- [150] Jordan C. The ionization equilibrium of elements between carbon and nickel. - Monthly Not.Roy.Astron.Soc., v.142, p.501, 1969.
- [151] Joselyn J., Holzer T.E. A study three-fluid coronal expansion for nonspherical geometries, - J.Geophys.Res., v.83, p.1357, 1978.
- [152] Klein L.W., Ogilvie K.W., Burlaga L.F. Coulomb collisions in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.90, N 8, p.7389, 1985.
- [153] Kozlovsky B.Z. The stages of ionization of oxygen and helium in the solar wind, - Solar Phys., v.5, p.410, 1968.
- [154] Krieger A.S., Timothy A.F., Roelof E.C. A coronal hole and its identification as the source of a high velocity solar wind stream. - Solar Phys., v.29, p.505, 1973.
- [155] Kunz S., Bochsler P., Geiss J., Ogilvie K.W., Coplan M.A. Determination of solar wind elemental abundances from M/Q observations during three periods in 1980, - Solar Phys., v.88, p.359, 1983.
- [156] Lambert D.L. Abundance of helium in the Sun, - Nature, v.215, p.43, 1967.
- [157] Lange J., Scherb R. Ion abundance in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.75, N 31, p.6350, 1970.
- [158] Le G., Russell C.T., Petrinec S.M. The magnetosphere on May 11, 1999, the day the solar wind almost disappeared: I.Current systems, - Geophys.Res. Lett., v. 27, p.1827, 2000.
- [159] Leer E., Holzer T.E. Energy addition in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.85, N 9, p.4681, 1980.
- [160] 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., v.100, p.16999, 1995.
- [161] Liu S., Marsch E., Livi S., Woch J., Wilken B., von Steiger R., Gloeckler G., Radial gradients of ion densities and temperatures derived from SWICS/Ulysses observations, - Geophys.Res.Lett., v.22, N 18, p.2445, 1995
- [162] Lopez R.E. Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationship, - J.Geophys.Res., v.92, N 10, p.11189, 1987.
- [163] Lopez R.E., Freeman J.W. Solar wind proton temperature-velocity relationship, - J.Geophys.Res., N 2, p.1701, 1986.

- [164] Lopez R.E., Freeman J.W., Roelof E.C. The relationship between proton temperature and momentum flux density in the solar wind. -Geophys.Res.Lett., 13, N 7, 640, 1986
- [165] 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., v.87, N 1, p.35, 1982.
- [166] McKenzie J.F., Ip W.H., Axford W.I. Anomalous acceleration of minor ions in the solar wind, - Nature, N 274, p.350, 1978.
- [167] Moreno G., Palmiotto F. Variations of  $\alpha$ -particle abundance in the solar wind. - Solar Phys., v.30, p.207, 1973.
- [168] Mullan D.J. Momentum flux invariance in the solar wind. - Astrophys.J., v.272, p.325, 1983.
- [169] Munro R.H., Jackson B.V. Physical properties of a polar coronal hole from 2 to 5  $R_o$ , - Astrophys.J., v.213, N3, p.874, 1977.
- [170] Nakada M.P. A study of composition of the lower solar corona, - Solar Phys., N 7, p.302, 1969.
- [171] Nakada M.P. A study of composition of the solar corona and solar wind, - Solar Phys., v.147, p.457, 1970.
- [172] Neugebauer M. The quiet solar wind, - J.Geophys.Res., v.81, N 25, p.4664, 1976.
- [173] Neugebauer M. The role of Coulomb collisions in limiting differential flow and temperature differences in the solar wind. - J.Geophys.Res., v.81, N 1, p.78, 1976.
- [174] Neugebauer M. Observation of solar wind helium, - Fundamentals of Cosmic Physics, N 7, p.131, 1981a.
- [175] Neugebauer M. Observations of solar wind helium, - in *Proceedings of Solar Wind Four Conference*, Rep. MPAE-W-100-81-31, edited by H. Rosenbauer, p. 425, Max-Planck-Institut fur Aeronomie, Katlendorf-Lindau, 1981b.
- [176] Neugebauer M. Measurements of the properties of solar wind plasma relevant to studies of its coronal sources, - Space Sci.Rev., v.33, p.127, 1982.
- [177] Neugebauer M. Knowledge of coronal heating and solar-wind acceleration obtained from observations of the solar wind near 1 AU, -in *Proceedings of Solar Wind Seven Conference*, COSPAR Colloquia, v.3, edited by E. Marsch and R. Schwenn, p.69, Pergamon, Tarrytown, N.Y., 1992.



- [178] Neugebauer M., Feldman W.C. Relation between superheating and super acceleration of helium in the solar wind, - Solar Phys., v.63, p.201, 1979.
- [179] Neugebauer M., Snyder C.W. The mission of Mariner 2: planetary observation. Solar plasma experiment. - Science, v. 138, p. 1095, 1962
- [180] Neugebauer M., Snyder C.W. Mariner 2 observation of the solar wind. 1.Average Properties, - J.Geophys.Res., v.71, p.4469, 1966.
- [181] Neugebauer M., Goldstein B.E., Bame S.J., Feldman W. C. ULYSSES near-ecliptic observations of differential flow between protons and alphas in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.99 (A2), p.2505, 1994.
- [182] Neupert W.M., Pizzo V. Solar coronal holes as sources of geomagnetic disturbances, - J.Geophys.Res., v.79, p.3701, 1974.
- [183] Newkirk G.Jr. Structure of solar corona. - Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v.5, p.213, 1967.
- [184] Nolte J.T., Krieger A.S., Timothy A.F., Gold R.E., Roelof E.C., Vaiana G.S., Lazarus A.J., Sullivan J.D., McIntosh P.S. Coronal holes as sources of solar wind, - Solar Phys., v.46, p.303,1976.
- [185] Ogilvie K.W. Helium abundance variations, - J.Geophys.Res., v.77, p.4227, 1972.
- [186] Ogilvie K.W. Differences between the bulk speeds of hydrogen and helium in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.80, p.1335, 1975.
- [187] Ogilvie K.W. Analysis of  $O^{7+}/O^{6+}$  observations in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.90, N 10, p.9881, 1985.
- [188] Ogilvie K.W., Hiresberg J. The solar cycle variations of the solar wind helium abundance. - J.Geophys.Res., v.79, 1974.
- [189] Ogilvie K.W., Vogt C. Variation of the average "freezing-in" temperature of oxygen ions with solar wind speed, - Geophys.Res.Lett., v.7, p.577, 1980.
- [190] Ogilvie K.W., Wilkerson T.D.W. Helium abundance in the solar wind, - Solar Phys., v.8, N 2, p.435, 1969.
- [191] Ogilvie K.W., Zwally H.J. Hydrogen and helium velocities in solar wind, - Solar Phys., v.24, p.236, 1972.
- [192] Ogilvie K.W., Burlaga L.F., Wilkerson T.D. Plasma observations on Explorer 34, - J.Geophys.Res., v.73, p.6809, 1968.

- [193] Ogilvie K.W., Coplan M.A., Zwickl R.D. Helium, hydrogen, and oxygen velocities observed on ISSE 3, - J.Geophys.Res., v.87, N 9, p.7363, 1982.
- [194] Ogilvie K. W., Coplan M. A., Bochsler P., Geiss J. Solar wind observations with Ion Composition Instrument aboard the ISEE 3/ICE spacecraft, - Solar Phys., v. 124, p.167, 1989.
- [195] Osherovich V.A., Farrugia C.J., Burlaga L.F., Lepping R.P., Fainberg J., Stone R.G. Polytropic relation in the interplanetary clouds, - J.Geophys.Res., v.98, p.15331, 1993.
- [196] Owocki S.P., Hundhausen A.J. The effect of a coronal shock wave on the solar wind ionization state, - Astrophys.J., v.274, N 1, p.414, 1983.
- [197] Owocki S.P., Scudder J.D. The effect of a non-Maxwellian electron distribution on oxygen and iron ionization balances in the corona, - Astrophys.J., v.270, N 2, p.758, 1983.
- [198] Owocki S.P., Holzer T.E., Hundhausen A.J. The solar wind ionization state as a coronal temperature diagnostic, - Astrophys.J., v.275, p.354, 1983.
- [199] Parker E.N. The solar wind, - J.Res.Nat.Bur.Standards, N 65D, p.537, 1961.
- [200] Perreault P., Akasofu S.-J. A study of geomagnetic storms, - Geophys.J.R.Astr.Soc., N 54, p.547, 1978.
- [201] Petrinec S.M., Russell C.T. Near-Earth magnetotail shape and size as determined from the magnetopause flaring angle, - J.Geophys.Res., v.101, p.137, 1997.
- [202] Pissarenko N.F., Dubinin E.M., Zakharov A.V., Budnik E.Yu., Lundin R. Observation of  $He^+$  ions in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.90, N 5, p.4367, 1985.
- [203] Pizzo V., Gosling J.T., Hundhausen A.J., Bame S.J. Large- scale dynamical effects upon the solar wind flow parameters, - J.Geophys.Res., v.78, p.6469, 1973.
- [204] Richardson I.G., Berdichevsky D., Desch M.D., Farrugia C.J., Solar-cycle variation of low density solar wind during more than three solar cycles, - Geophys.Res.Lett., V. 27, N 23 P. 3761, 2000.
- [205] Robbins D.E., Hundhausen A.J., Bame S.J. Helium in the solar wind, - J.Geophys.Res., v.75, N7, p.1778, 1970.
- [206] Roelof E.C., Sibeck D.G. Magnetopause shape as bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure, - J.Geophys.Res., v.98, N A12, p.21421, 1993.

- [207] Rosner R., Vaiana G.S. Hydrostatic and dynamic models of solar coronal holes, - *Astrophys.J.*, v.216, p.141, 1977.
- [208] 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.*, v.72, p.5853, 1967.
- [209] Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity, - *J.Geophys.Res.*, v.78, p.24,1973.
- [210] Russell C.T., McPherron R.L., Burton R.K. On the cause of geomagnetic storms, - *J.Geophys.Res.*, v.79, p.1105, 1974.
- [211] Ryan J.M., Axford W.I. The behavior of minor ion species in the solar wind, - *J.Geophys.Res.*, v.41, p.221, 1975.
- [212] Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al. The January 10-11, 1997, magnetic cloud: Multipoint measurements, - *Geophys.Res.Lett.*, v. 25, p.2545, 1998.
- [213] Sastri J.H. Solar wind flow associated with stream-free sector boundaries at 1 AU. - *Solar Phys.*, v.111, N 2, p.429, 1987.
- [214] Savin S., Balan O., Borodkova N. et al. INTERBALL magnetotail boundary case studies, - *Adv.Space Res.*, v.20, N 4/5, p.999,1997.
- [215] Schwenn R. The average solar wind in the inner heliosphere structure and slow variations, - *Solar Wind Five*, Ed. Neugebauer M., NASA Conf. Publ, v.2280, p. 489, 1983.
- [216] Schwenn R., Rosenbauer H., Muhlhauser K.-H. Singly-ionized helium in the driver gas of an interplanetary shock, - *Geophys.Res.Lett.*, v.7, N 3, p.201, 1980.
- [217] Sheeley N.R.Jr., Harvey J.W., Feldman W.C. Coronal holes, solar wind streams and recurrent geomagnetic disturbances: 1973-1976. - *Solar Phys.*, v.49, p.271, 1976.
- [218] Shue J.-H., Chao J.K., Fu H.C. et al. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape,- *J.Geophys.Res.*, v.102, N 5, p.9497, 1997.
- [219] Shue J.-H., Song P., Russell C. T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions,- *J.Geophys.Res.*, v.103, N A8, p.17691, 1998.
- [220] Shull J.M., Van Steenberg M. The ionization equilibrium of astrophysically abundant elements, - *Astrophys.J.*, v.48, p.96, 1982.

- [221] Sibeck D.G., Baumjohann W., Lopez R.E. Solar wind dynamic pressure variations and transient magnetospheric signature, - *Geophys.Res.Lett.*, v.16, p.13, 1989.
- [222] Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C. Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion, - *J.Geophys.Res.*, v.96, N A4, p.5489, 1991.
- [223] *Solar-Geophysical Data*, N 490, part 1, p.78, 1985.
- [224] *Solar-Geophysical Data*, N 491, part 2, p.24, 1985.
- [225] *Solar-Geophysical Data*, N 494, part 1, p.80, 1985.
- [226] *Solar-Geophysical Data*, N 494, part 2, p.23, 1985.
- [227] *Solar-Geophysical Data*, N 496, part 2, p.48, 1985.
- [228] *Solar Cycle and Space Weather*, ESA SP-477, 2002.
- [229] *Space Weather*, Ed. by Paul Song, Howard J. Singer, and George L. Siscoe, - *Geophysical Monograph Series*, v.125, 2001.
- [230] Spitzer D.Jr. *Physics of fully ionized gases*, 2nd Ed., John Wiley, - N. Y., p.170, 1962.
- [231] Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere, - *Planet.Space Sci.* v.14. p.223,1966.
- [232] Steinitz R. Momentum flux invariance and solar wind sources. - *Solar Phys.*, v.83, N 1, p.379, 1983.
- [233] Steinitz R., Eyni M. Global properties of the solar wind. 1.The invariance of the momentum flux density. - *Astrophys.J.*, v.241, N 1, p.417, 1980.
- [234] Styazhkin V., Yeroshenko E., Zakharov P. Magnetic field experiment in the Intershock project.-*INTERSHOCK Project*, - *Publ.of Astronom.Inst.of Czechoslovak Academy of Sciences*, N 60, p.202, 1985.
- [235] *SUBSTORMS-4* Ed. S. Kokubun, and Y. Kamide. *Terra Sci. Publ. Com./Kluwer Acad. Publ.* 1998.
- [236] *SUBSTORMS-5* Ed. A. Wilson, ESA SP-443, 2000.
- [237] Ulmschneider P., Priest E.R., Rosner R. (Eds.), *Mechanisms of chromospheric and coronal heating*. - Springer-Verlag, Heidelber, 1991.
- [238] Unsold A.O.J. Stellar abundances and the origin of the elements. - *Science*, v.163, p.1015, 1969.

- [239] Usmanov A.V., Goldstein M.L., Farrell W.M. A View of the Inner Heliosphere During the May 10-11, 1999 Low Density Anomaly, - *Geophys.Res.Lett.*, V.27, N 23, P 3765, 2000.
- [240] Webb D.F., Geomagnetic Storms and Heliospheric CMEs as Viewed from HELIOS, - In *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference Series, v. 95, p.167, 1996.
- [241] Wolfe J.H., Silva R.W., McKibbin D.D., Mason R.H. The compositional, anisotropic, and nonradial flow characteristics of the solar wind. - *J.Geophys. Res.*, v.71, p.3329, 1966.
- [242] Yeh T. A three-fluid model of solar wind, - *Planet.Space Sci.*, v.13, p.199, 1970.
- [243] Yermolaev Yu.I. Large-scale structure of solar wind and its relationship with solar corona: Prognoz 7 observations. - *Planet. Space Sci.*, v.39, N 10, p.1351-1361, 1991.
- [244] Yermolaev Yu.I. Helium abundance, acceleration, and heating and large-scale structure of the solar wind, - *Solar Wind Seven. COSPAR Colloquia Series* 1991, Ed. Marsch E., Schwenn R., p.411, 1992a.
- [245] 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, p.339-342, 1992b.
- [246] Yermolaev Yu. I. Signature of coronal holes and streamers in the interplanetary space, - *Space Sci. Rev.*, v.70, p.379, 1994.
- [247] Yermolaev Yu.I. Transport of mass, momentum and energy from the Sun to the Earth by different types of solar wind streams, - In: *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conference series, v.95, p.288-299, 1996.
- [248] Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu. Statistical relations between solar, interplanetary and geomagnetic disturbances during 2.3 solar cycles (1976-2000), - *ESA SP-477*, p.579-582, 2002.
- [249] Yermolaev Yu. I., Stupin V. V. Some alpha-particle heating and acceleration mechanisms in the solar wind: Prognoz 7 measurements,- *Planet. Space Sci.*, v.38, N 10, p. 1305, 1990.
- [250] Yermolaev Yu.I., Stupin V.V. Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognoz 7 observations. *J.Geophys.Res.*, 102, N A2, p.2125-2136, 1997.

- [251] 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 Пр-1575, М.: ИКИ АН СССР, 1990.
- [252] Yermolaev Yu.I., Stupin V.V., Kozak I. Dynamics of proton and  $\alpha$  particle velocities and temperatures in the solar wind: Prognoz 7 observations, - Adv. Space Res., N11 (1), p.79, 1991.
- [253] Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Borodkova N.L. et al. Magnetic cloud event on 6-11 January, 1997: INTERBALL multi-satellite and multi-instrument observations, - Proc. 31st ESLAB Symp. ESA SP-415. p.155, 1997.
- [254] Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Nozdrachev M.N. et al. Plasma populations in the magnetosphere during the passage of magnetic cloud on 10-11 January, 1997:INTERBALL/Tail Probe observations, - Geophys.Res. Lett., v. 25, p.2565, 1998.
- [255] Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N., Borodkova N.L. et al. Statistic study of magnetosphere response to magnetic clouds: INTERBALL multi-satellite observations, - Phys. Chem. Earth (C), v.25, p.177, 2000.
- [256] Zastenker G.N., Borodkova N.L. Some features of the interplanetary disturbances in the post-solar maximum year period, - Adv. Space. Res., N 4 (7), p.347, 1984.
- [257] Zastenker G.N., Borodkova N.L. Long-term energy and momentum flux fluctuations of the solar wind, - J.Geomag.Geolectr., N 43, part 1, p.89, 1992.
- [258] Zastenker G.N., Yermolaev Yu. I. Observation of solar wind stream with high abundance of heavy ions and relation with coronal conditions. - Planet. Space Sci., v.29, N 11, p.1235, 1981.
- [259] 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., v.9, N 4, p.117, 1989.
- [260] Zastenker G.N., Avanov L.A., Yermolaev Yu.I. et al. Variability of the coronal structures and ion components in the solar wind. - Czechoslovak Journal of Physics, v.B 41, N 10, p.1001, 1991.
- [261] Zinner E., Walker R.M., Borg J., Maurette M. Measurements of heavy solar-wind particles during the Apollo 17 mission, Solar Wind Three, ed. C.T.Russell, N 27, 1974.
- [262] Zirin H. The solar atmosphere. Blaisdell, Waltham, Mass., 1966.

- [263] Zwickl R.D., Asbridge J.R., Bame S.J., Feldman W.C., Gosling J.T.  $He^+$  and other unusual ions in the solar wind: a systematic search covering 1972-1980. - J.Geophys.Res., v.87, N 9, p.7379, 1982.

# Список принятых сокращений

Русские сокращения:

ММП - межпланетное магнитное поле,

СВ - солнечный ветер,

СКЛ - солнечные космические лучи.

Английские сокращения:

BES - bidirectional electron stream (двунаправленные течения электронов),

BS - bow shock (головная ударная волна - ГУВ),

CIR - corotating interaction region,

CH - coronal hole (корональная дыра),

CS - coronal streamer (корональный стример),

INS - interstream (интерстрим или плазма между двумя быстрыми течениями солнечного ветра),

IS - interplanetary shock (межпланетная ударная волна - МУВ),

HAЕ - helium abundance enhancement (возрастание содержания гелия),

HCS - heliospheric current sheet (гелиосферный токовый слой - ГТС),

LE - leading edge (передний фронт),

MC - magnetic cloud (магнитное облако),

MP - magnetopause (магнитопауза - МП),

MS - magnetosphere (магнитосфера),

MSH - magnetosheath (магнитослой или переходная область между BS и MP - ПО),

NCDE - noncompressive density enhancement (несвязанное со сжатием увеличение плотности),

PS - plasma sheet (плазменный слой),

TE - trailing edge (задний фронт).



# Список иллюстраций

1.1	Примеры массовых спектров ионов солнечного ветра, полученных в предположении равенства переносных скоростей всех ионных компонент из энергетических спектров, измеренных на спутниках <i>Vela 5,6</i> [72, Vame et al., 1974]. Вертикальные линии указывают положение наиболее распространенных ионных компонент. . . . .	39
1.2	Схема солнечно-земных связей. . . . .	45
2.1	Схематическое изображение электростатического анализатора: 1 - коллиматор; 2 - набор сеток; 3 - цилиндрический дефлектор; 4 - детектор (ВЭУ-6). . . . .	52
2.2	Схематическое изображение селективного анализатора с фильтром Вина, цилиндрическим дефлектором и детектором. . . . .	53
2.3	Энергетическая (а) и угловые (б) характеристики селективного датчика прибора СКС-04, установленного на спутнике <i>Прогноз 7</i> [8, Вайсберг и др., 1979]. . . . .	54
2.4	Схематическое изображение цилиндра Фарадея. . . . .	55
2.5	Угловые характеристики а) одного и б) трех цилиндров Фарадея прибора СКС-04 в полярной системе координат, в которой за начало отсчета выбрана ось прибора, ориентированная вдоль оси вращения спутника <i>Прогноз 7</i> [23, Ермолаев, 1988]. . . . .	56
2.6	Схематическое изображение энерго-масс-анализатора ДФП-М на спутнике <i>Прогноз-10-Интеркосмос</i> (проект "Интершок") [31, Ермолаев и др., 1986]: 1 - ускоряющий промежуток, 2 - коллиматор, 3 - цилиндрический 127-градусный дефлектор, 4 - постоянный магнит, 5 - цилиндрический 63-градусный дефлектор, 6 - детектор (МКП). . . . .	58
2.7	Функция отклика цилиндра Фарадея прибора СКС-04 [23, Ермолаев, 1988] для различных значений тепловой ширины потока ионов $\kappa = T[K]/v^2[\text{км/с}]$ и углов падения потока $\delta$ . . . . .	64
2.8	Пример спектра по энергии на заряд, измеренного 11 декабря 1978 г. на спутнике <i>Прогноз 7</i> [9, Вайсберг и др., 1980]. Цифры на вертикальных линиях показывают степень ионизации соответствующего химического элемента, кружки - экспериментальные значения. . . . .	68

2.9	Двумерная угловая характеристика электростатического анализатора прибора СКС-04 [23, Ермолаев, 1988]. Угол $\alpha$ измеряется в плоскости перпендикулярной пластинам анализатора, угол $\beta$ - в перпендикулярной плоскости. . . . .	70
2.10	Функция отклика электростатического анализатора прибора СКС-04 для различной тепловой ширины потока ионов в двух взаимноперпендикулярных плоскостях: а) по углу $\alpha$ , б) по углу $\beta$ [23, Ермолаев, 1988]. . . . .	71
2.11	Пример массового спектра, синтезированного из шести спектров электростатического анализатора, измеренных с 01.59 до 02.40 UT 11 декабря 1978 г. на спутнике <i>Прогноз 7</i> [9, Вайсберг и др., 1980]. Обозначения те же, что на Рис.2.8; кружки - рассчитанные вторым методом значения. . . . .	72
3.1	Долгопериодические вариации числа солнечных пятен $N$ и параметров солнечного ветра (переносной скорости $v$ , величины магнитного поля $B$ и относительного содержания гелия $n_\alpha/n_p$ ) в цикле солнечной активности [14, Веселовский, 1984]. Светлые кружки – данные спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988].	82
3.2	Последовательность энергетических спектров ионов солнечного ветра, измеренных с высоким временным разрешением (один спектр измерялся за 0.64 с) с помощью плазменного комплекса БИФРАМ на спутнике <i>Прогноз-10-Интеркосмос</i> [12, Вайсберг и др., 1986]. . . . .	83
3.3	Результаты измерений сравнительно медленного перехода от потока солнечного ветра со скоростью $v = 470$ км/с к более медленному потоку с $v = 420$ км/с, полученные 04 января 1981 г. с помощью прибора МОНИТОР на спутнике <i>Прогноз 8</i> [1, Аванов и др., 1984] . <b>Левая панель.</b> Последовательность энергетических спектров ионов, время начала каждого спектра показано справа. <b>Правая панель.</b> Временная эволюция углов прихода потока при быстром обратном переходе от одного течения к другому. . . . .	84
3.4	Гистограммы распределения параметров солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]: а) концентрация ионов $n$ , б) модуля магнитного поля $B$ и в) величины альвеновской скорости $v_A$ . . . . .	86
3.5	Гистограммы распределения скоростей протонов $v_p$ (сплошная линия) и $\alpha$ -частиц $v_\alpha$ (штриховая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. . . . .	87
3.6	Гистограммы распределения отношения массовых скоростей $\alpha$ -частиц и протонов $v_\alpha/v_p$ по данным спутников <i>IMP 6</i> , <i>7</i> [65, Asbridge et al., 1976], <i>Прогноз 1</i> [86, Bosqued et al., 1977] и <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. . . . .	87

3.7	Гистограммы распределения температур протонов $T_p$ (сплошная линия) и $\alpha$ -частиц $T_\alpha$ (штриховая линия по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. . . . .	89
3.8	Гистограммы распределения отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ по данным спутников <i>Vela 3</i> , <i>Explorer 34</i> , <i>OGO 5</i> [174, Neugebauer, 1981], <i>Прогноз 1</i> [86, Bosqued et al., 1977] и <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988] . . . . .	90
3.9	Гистограммы распределения отношения скоростей $v_\alpha/v_p$ и температур $T_\alpha/T_p$ $\alpha$ -частиц и протонов в горячем солнечном ветре ( $T_p > 3 \cdot 10^5$ K) за фронтом межпланетных ударных волн по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [68, Avakov et al., 1987]. . . . .	91
3.10	Гистограммы распределения отношения скоростей $\alpha$ -частиц и протонов $v_\alpha/v_p$ при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 1,007 \pm 0,054$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 10 раз) - $T_p > 2 \cdot 10^5$ K ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 1,005 \pm 0,054$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 20 раз) - $T_p > 3 \cdot 10^5$ K ( $\langle v_\alpha/v_p \rangle = 0,998 \pm 0,076$ ) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. . . . .	92
3.11	Гистограммы распределения отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 5,00 \pm 3,88$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 8 раз) - $T_p > 2 \cdot 10^5$ K ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 2,98 \pm 2,99$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 20 раз) - $T_p > 3 \cdot 10^5$ K ( $\langle T_\alpha/T_p \rangle = 2,72 \pm 1,85$ ) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. Усреднение проводилось по всему диапазону значений $T_\alpha/T_p$ . . .	93
3.12	Гистограммы распределения относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ при разной температуре солнечного ветра: сплошная линия - для всех данных ( $\langle n_\alpha/n_p \rangle = 6,50 \pm 6,52$ ), штриховая линия (гистограмма увеличена в 7 раз) - $T_p > 2 \cdot 10^5$ K ( $\langle n_\alpha/n_p \rangle = 4,47 \pm 4,05$ ), пунктирная линия (гистограмма увеличена в 15 раз) - $T_p > 3 \cdot 10^5$ K ( $\langle n_\alpha/n_p \rangle = 3,04 \pm 2,80$ ) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [32, Ермолаев и др., 1988]. Усреднение проводилось по всему диапазону значений $n_\alpha/n_p$ . . .	94
3.13	Двумерная гистограмма зависимости кинетической температуры протонов солнечного ветра $T_p$ от их переносной скорости $v_p$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [21, 23, 32, Ермолаев, 1986, 1988; Ермолаев и др., 1988]. . . . .	96
3.14	Двумерная гистограмма зависимости концентрации ионов солнечного ветра $n$ от переносной скорости протонов $v_p$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [21, 23, 32, Ермолаев, 1986, 1988; Ермолаев и др., 1988].	97

- 3.15 Зависимость кинетической температуры протонов  $T_p$  и концентрации ионов  $n$  солнечного ветра от его скорости  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [22, Ермолаев]: а) число измерений  $T_p$  и  $n$  в интервалах усреднения  $\Delta v_p = 10$  км/с; б) точки - средние значения температуры; результаты аппроксимации: сплошная линия -  $lg T_p = (2,38 \pm 0,18)lg v_p - (1,61 \pm 0,10)$ , штриховая линия -  $T_p^{1/2} = (0,027 \pm 0,003)v_p - (2,64 \pm 0,21)$ ; в) точки - средние значения концентрации; результаты аппроксимации: сплошная линия -  $lg n = -(1,4 \pm 0,5)lg v_p + (4,4 \pm 0,1)$ , штриховая линия (в интервале скоростей  $v_p < 550$  км/с) -  $n \propto v_p^{-2,0 \pm 0,3}$ , линия штрих с точкой (в интервале скоростей  $v_p > 550$  км/с) -  $n \propto v_p^{-0,8 \pm 1,0}$ . . . 99
- 3.16 Зависимость кинетической температуры протонов  $T_p$  солнечного ветра от его потока импульса  $nv_p^2$  по данным спутника *Прогноз 7* [32, Ермолаев и др., 1988]: представлены результаты усреднения  $T_p$  и  $nv_p^2$  по интервалам скорости  $\Delta v_p = 10$  км/с в трех диапазонах скоростей: точки -  $v_p < 400$  км/с, крестики -  $400 < v_p < 550$  км/с, кружки -  $v_p > 550$  км/с. . . . . 101
- 3.17 Двумерная гистограмма зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 32, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1988]. 103
- 3.18 Средняя зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутников *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34* и *43* [185, Ogilvie, 1972], *HEOS 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *IMP 6-8* [74, Bame et al., 1977], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* [23, Ермолаев, 1988]. 104
- 3.19 Двумерная гистограмма зависимости относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, Ермолаев, 1988]. . . . . 106
- 3.20 Средняя зависимость относительного содержания  $\alpha$ -частиц  $n_\alpha/n_p$  от величины потока солнечного ветра  $nv_p$  по данным спутников *Vela 3* [136, Hirshberg et al., 1972], *Explorer 34, 43* [185, Ogilvie, 1972], *Heos 1* [167, Moreno and Palmiotto, 1973], *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981] и *Прогноз 7* [23, 244, Ермолаев, 1988; Yermolaev, 1992]. . . . 106
- 3.21 Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутника *Прогноз 7* [21, 23, Ермолаев, 1986, 1988]. . . . . 108
- 3.22 Средняя зависимость разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от скорости солнечного ветра  $v_p$  по данным спутников *IMP 6, 7* [65, Asbridge et al., 1976], *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer., 1981], *ISEE 3* [193, Ogilvie et al., 1982] и *Прогноз 7* [23, 25, Ермолаев, 1988, 1994]. . . . . 109

3.23	Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от скорости солнечного ветра $v_p$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [21, 23, Ермолаев, 1986, 1988]. . . . .	110
3.24	Средняя зависимость отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от скорости солнечного ветра $v_p$ по данным спутников <i>Vela 3</i> [111, Feynman, 1975], <i>Прогноз 1</i> [86, Bosqued et al., 1977], <i>Explorer 34</i> , <i>OGO 5</i> [82, Bollea et al., 1972], <i>ISEE 3</i> [152, Klein et al., 1985] и <i>Прогноз 7</i> [23, 25, Ермолаев, 1988, 1994] . . . . .	111
3.25	Средние зависимости от скорости солнечного ветра $v_p$ а) кинетической температуры протонов $T_p$ и концентрации ионов $n$ , а также числа измерений $N$ в элементарном интервале по скорости $\Delta v_p = 10$ км/с; б) относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ , разности переносных скоростей $v_\alpha - v_p$ и отношения кинетических температур $T_\alpha/T_p$ $\alpha$ -частиц и протонов по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [23, 249, Ермолаев, 1988; Yermolaev and Stupin, 1990]. . . . .	112
3.26	Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей $\alpha$ -частиц и протонов $v_\alpha - v_p$ от величины альвеновской скорости $v_A$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [23, 251, Ермолаев, 1988; Yermolaev et al., 1990]. . . . .	114
3.27	Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от величины альвеновской скорости $v_A$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [23, 251, Ермолаев, 1988; Yermolaev et al., 1990]. . . . .	114
3.28	Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от разности их переносных скоростей $v_\alpha - v_p$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990]. . . . .	116
3.29	Средняя зависимость отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от разности их переносных скоростей $v_\alpha - v_p$ по данным спутников <i>Прогноз 1</i> [86, Bosqued et al., 1977], <i>OGO 5</i> , <i>IMP 6-8</i> [178, Neugebauer and Feldman, 1979] и <i>Прогноз 7</i> [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990]. . . . .	117

- 3.30 Средняя зависимость отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от разности их переносных скоростей  $v_\alpha - v_p$ , нормированной на среднюю тепловую скорость  $W_T = [2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$ , для различных интервалов относительного содержания  $\alpha$ -частиц по данным спутника *Прогноз 7* [23, 34, Ермолаев, 1988; Ермолаев и др., 1990]: темные кружки -  $n_\alpha/n_p < 2\%$ , светлые кружки -  $2\% \leq n_\alpha/n_p \leq 5\%$  и крестики -  $n_\alpha/n_p > 5\%$ . Модельные расчеты [134, Hernandez and Marsch, 1985] представлены сплошной линией для  $n_\alpha/n_p = 5\%$  и штриховой линией для  $n_\alpha/n_p = 2,5\%$ . . . . . 118
- 3.31 Двумерная гистограмма зависимости разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра  $\tau_e$  к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_s$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990]. . . . . 121
- 3.32 Средняя зависимость разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов  $v_\alpha - v_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутников *Heos 2* [132, Grunwaldt and Rosenbauer, 1978], *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], и *Прогноз 7* (данные [21, Ермолаев, 1986] и Рис. 3.31). . . . . 122
- 3.33 Двумерная гистограмма зависимости отношения разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов к альвеновской скорости  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990]. . . . . 123
- 3.34 Средняя зависимость отношения разности переносных скоростей  $\alpha$ -частиц и протонов к альвеновской скорости  $(v_\alpha - v_p)/v_A$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутников *Explorer 43*, *OGO 5* [174, Neugebauer, 1981], *ISEE 3* [152, Klein et al., 1985] и *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990]. . . . . 123
- 3.35 Двумерная гистограмма зависимости отношения кинетических температур  $\alpha$ -частиц и протонов  $T_\alpha/T_p$  от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях  $\tau_e/\tau_s$  по данным спутника *Прогноз 7* [23, 25, 34, Ермолаев, 1988, 1994; Ермолаев и др., 1990]. . . . . 124

3.36	Средняя зависимость отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях $\tau_e/\tau_c$ по данным спутников <i>IMP 6</i> <i>OGO 5</i> [174, Neugebauer, 1981], <i>ISEE 3</i> [152, Klein et al., 1985] и <i>Прогноз 7</i> (данные [21, Ермолаев, 1986] и Рис. 3.35). . . . .	125
3.37	Двумерные зависимости а) числа измерений $N$ , б) отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ и в) отношения времени расширения солнечного ветра к характерному времени обмена энергией при кулоновских столкновениях $\tau_e/\tau_c$ от параметров $n/v_p$ и $T_{ef}$ по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [25, Ермолаев, 1994]. . . . .	126
3.38	То же, что на Рис. 3.37, но для температуры $\alpha$ -частиц $T_\alpha$ . . . . .	127
3.39	То же, что на Рис. 3.37, но для температуры протонов $T_p$ . . . . .	128
3.40	Средние зависимости отношений скоростей $v_\alpha/v_p$ и температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от гелиоцентрического расстояния [249, 244, Yermolaev and Supin, 1990; Yermolaev, 1992]. . . . .	128
4.1	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) величины магнитного поля солнечного ветра $B$ (нТ) (жирная линия) и числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	136
4.2	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) температуры протонов солнечного ветра $T_p(10^4\text{K})$ (жирная линия) и числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	136
4.3	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) отношения теплового давления к магнитному $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ (жирная линия) и числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	137
4.4	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ (жирная линия), числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) и величины потока $nv_p$ ( $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) (линия штрих-пунктирная) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. Области I, II и III описаны в тексте. . . . .	138
4.5	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) разности скоростей $\alpha$ частиц и протонов $v_\alpha - v_p$ (жирная линия) и числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	139

4.6	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ (жирная линия) и числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	140
4.7	Распределения на плоскости $n - v_p$ (концентрация - скорость) разных типов солнечного ветра (жирная линия), числа измерений $N$ в элементарной ячейке (тонкая линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [24, 243, Ермолаев, 1990, 1991]. . . . .	140
5.1	Гистограммы потоков частиц $nv_p$ для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]: на верхней панели - для течений из областей с низкой (тип CS солнечного ветра - сплошная линия) и сверхрадиальной (тип CH - штриховая линия) расходимостью коронального магнитного поля, и на нижней панели - для гелиосферного токового слоя (тип HCS - сплошная линия), для возмущенного солнечного ветра (тип CIR - штриховая линия) и для плазмы, выброшенной из солнечной атмосферы (тип MC - пунктирная линия). . . . .	153
5.2	Гистограммы потоков импульса $nv_p^2$ ( $m_p nv_p^2$ ) для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1. . . . .	154
5.3	Гистограммы потоков кинетической энергии $m_p nv_p^3/2$ для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1. . . . .	155
5.4	Гистограммы потоков тепловой энергии $nkT_p v_p$ для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1. . . . .	157
5.5	Гистограммы отношения теплового и магнитного давлений (или плотностей тепловой и магнитной энергии) $\beta = nkT_p/(B^2/8\pi)$ для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1. . . . .	158
5.6	Гистограммы распределения по разным типам солнечного ветра числа внезапных начал магнитосферных возмущений (SSC) - сплошная линия (шкала справа) и частоты появления SSC - штриховая линия (шкала справа) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [30, 247, Ермолаев и Ступин, 1992; Yermolaev, 1996] . . . . .	163



5.7	Гистограммы относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ для разных типов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [247, Yermolaev, 1996]. Обозначения такие же, как на Рис. 5.1. . . .	164
5.8	Зависимость относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ от скорости солнечного ветра $v_p$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> : в гелиосферном токовом слое (светлые кружки), в течениях из корональных стримеров (крестики) и корональных дыр (темные кружки), в CIR (звездочки) и в магнитных облаках (треугольники) [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. . . . .	165
5.9	Зависимость относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ от плотности солнечного ветра $n$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	167
5.10	Зависимость относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ от величины потока солнечного ветра $nv_p$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	167
5.11	Зависимость разности скоростей $v_\alpha - v_p$ и отношения температур $T_\alpha/T_p$ $\alpha$ -частиц и протонов от скорости солнечного ветра $v_p$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	168
5.12	Зависимость разности скоростей $v_\alpha - v_p$ и отношения температур $T_\alpha/T_p$ $\alpha$ -частиц и протонов от альвеновской скорости солнечного ветра $v_A$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	170
5.13	Зависимость отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от их разности скоростей относительно их средней тепловой скорости $X = \Delta v/[2k(T_\alpha/m_\alpha + T_p/m_p)]^{1/2}$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	171
5.14	Зависимость разности скоростей $\Delta v$ и $\Delta v/v_A$ от отношения времени расширения солнечного ветра к времени обмена импульсом при кулоновских столкновениях $\tau_e/\tau_s$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	173

5.15	Зависимость отношения температур $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha/T_p$ от отношения времени расширения солнечного ветра к времени обмена энергией при кулоновских столкновениях $\tau_e/\tau_c$ в разных типах течений солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [250, Yermolaev and Stupin, 1997]. Обозначения такие же, как и на Рис. 5.8. . . . .	174
5.16	Периоды наблюдения тяжелых ионов солнечного ветра по данным спутника <i>Прогноз 7</i> для восьми оборотов Солнца (номера и даты начала Каррингтоновских оборотов с 1986 по 1993 показаны слева). Обозначения: двойная штриховка - дни надежной и длительной регистрации тяжелых ионов; простая штриховка - дни спорадического наблюдения тяжелых ионов; прочерк - дни, когда тяжелые ионы не регистрировались; пустые клетки - дни, когда измерения не проводились или условия в солнечном ветре не позволяли наблюдать тяжелые ионы [28, Ермолаев и Застенкер, 1990]. . . . .	182
5.17	Динамика для периода 16-19 ноября 1978 г. 1) содержания кислорода, кремния и железа (в скоростях счета детектора), 2) содержания кремния и железа относительно кислорода, 3) ионизационных температур ионов кислорода, кремния и железа, 4) концентрации ионов, 5) кинетической температуры $\alpha$ -частиц и протонов $T_\alpha$ (пунктирная линия) и $T_p$ (сплошная линия) и 6) их переносных скоростей $v_\alpha$ (пунктирная линия) и $v_p$ (сплошная линия) по данным спутника <i>Прогноз 7</i> [28, Ермолаев и Застенкер, 1990]. . . . .	186
5.18	То же, что на рис. 5.17, для периода 24-25 ноября 1978 г. . . . .	187
5.19	То же, что на рис. 5.17, для периода 2-5 декабря 1978 г. . . . .	188
5.20	То же, что на рис. 5.17, для периода 10-13 декабря 1978 г. . . . .	189
5.21	То же, что на рис. 5.17, для периода 6-8 февраля 1979 г. . . . .	190
5.22	То же, что на рис. 5.17, для периода 4-5 июня 1979 г. . . . .	191
5.23	Зависимость от полной концентрации ионов солнечного ветра содержания гелия, кислорода, кремния и железа а) относительно кислорода и б) относительно водорода. Данные спутника <i>Прогноз 7</i> [28, Ермолаев и Застенкер, 1990]. . . . .	196
5.24	Схематическое изображение магнитных силовых линий, а также распределения концентрации протонов $n_p$ и относительного содержания $\alpha$ -частиц $n_\alpha/n_p$ в области коронального стримера (по модели [127, Gosling et al., 1981]). . . . .	196
5.25	Динамика гидродинамических параметров (величины потока, концентрации, температуры и скорости $\alpha$ -частиц (крестики) и протонов (точки)) по данным спутника <i>Прогноз-10-Интеркосмос</i> 30 апреля 1985 г. . . . .	201

5.26	Динамика магнитного поля (модуль и углы) по данным спутника <i>Прогноз-10-Интеркосмос</i> 30 апреля 1985 г. Сплошной линией внизу указаны интервалы пребывания спутника в солнечном ветре. . . . .	202
5.27	Энергетический спектр ионов солнечного ветра, измеренный 30 апреля 1985 г. в период 16.13-16.21 UT с помощью масс-спектрометра ДФП-М комплекса БИФРАМ на спутнике <i>Прогноз-10-Интеркосмос</i> [33, Ермолаев и др., 1989]. Результаты измерений (точки), относящиеся к измерениям с фиксированным значением $M/q$ , соединены сплошными линиями. Пунктирные линии представляют результаты аппроксимации результатов измерений.	204
5.28	Модельный энергетический спектр ионов солнечного ветра, полученный по данным Рис. 5.27. . . . .	205
6.1	Временные вариации среднегодовых значений числа солнечных пятен (кривая 1, шкала слева), числа сильных (класса выше M5) солнечных вспышек (кривая 2, шкала справа), числа сильных вспышек с возрастанием СКЛ (класса выше M0) (кривая 3, шкала справа) и числа сильных магнитных бурь со значениями $D_{st}$ индекса в минимуме менее -60 нТ (кривая 4, шкала справа). . . .	213
6.2	Верхние части панелей: вертикальные отрезки вверх и вниз относительно горизонтальной линии - сильные солнечные вспышки на западных (вверх) и восточных (вниз) частях солнечного диска. Средние части панелей: временной ход $D_{st}$ индекса. Нижние части панелей: явления в межпланетном пространстве (темные треугольники - MC, светлые треугольники - CIR, ромбики - IS, вопросительный знак - неопределенный тип события, крестик - нет данных). . . . .	215
6.3	Продолжение Рис. 6.2 для 1981-1985 годов. . . . .	216
6.4	Продолжение Рис. 6.2 для 1986-1990 годов. . . . .	217
6.5	Продолжение Рис. 6.2 для 1991-1995 годов. . . . .	218
6.6	Продолжение Рис. 6.2 для 1996-2000 годов. . . . .	219
6.7	Распределения среднечасовых значений $D_{st}$ индекса за 1976-2000 годы (толстая линия, шкала справа), за спокойный 1976 и возмущенный 1989 годы (штриховая и тонкая сплошная линии, шкала слева). . . . .	221
6.8	Распределения числа сильных солнечных вспышек (сплошная линия 1) и вспышек с СКЛ (сплошная линия 2) и числа сильных магнитных бурь (штриховая линия 3) по месяцам, полученные методом наложения эпох за период 1976-2000 годов. . . . .	222

6.9	Верхняя панель: схематическое пояснение к определению возможной геоэффективности вспышки ( $a, b, c$ и $d$ ) по временной задержке. Нижняя панель: число западных и восточных сильных солнечных вспышек (штриховая и сплошная линии), после которых явно ( $a$ ), вероятно ( $b$ ), маловероятно ( $c$ ) наблюдались и не наблюдались ( $d$ ) магнитные бури. . . . .	226
6.10	Верхняя панель: положение геоэффективных сильных вспышек на солнечном диске - кружки, треугольники и ромбики - события типов $a, b$ и $c$ . Нижняя панель: положение негеоэффективных сильных вспышек - события типа $d$ (см. текст). . . . .	227
6.11	Зависимость минимума $D_{st}$ индекса во время магнитных бурь от класса (потока энергии) сильных солнечных вспышек (верхняя панель) и вспышек с СКЛ (нижняя панель). Обозначения: светлые и темные значки - западные и восточные вспышки; кружки, треугольники и ромбики - события типа $a, b$ и $c$ . . . . .	229
6.12	Число СМЕ и СМЕ, сопровождавшихся солнечными вспышками (штриховая и сплошная линии), после которых явно ( $a$ ), вероятно ( $b$ ), маловероятно ( $c$ ) наблюдались и не наблюдались ( $d$ ) магнитные бури. . . . .	230
6.13	Распределение магнитных бурь по типам возмущений солнечного ветра. . . . .	231
6.14	Изменение доли магнитных бурь, возбужденных МС (темная линия) и CIR (светлая линия). Штриховая линия - число солнечных пятен (шкала справа) [27, Ермолаев и Ермолаев, 2002].	232
6.15	Параметры плазмы и магнитного поля в магнитном облаке 10-11.01.1997 г. по наблюдениям на спутнике <i>WIND</i> : верхние три панели - модуль и два угла магнитного поля; плотность, тепловая скорость, последние три панели - два угла и модуль переносной скорости. . . . .	234
6.16	Среднечасовые значения $D_{st}$ индекса для интервала с августа 1995 г. по декабрь 1988 г., треугольники - сильные магнитные бури, горизонтальные с зелеными и синими отрезками - наблюдения МС и CIR, вертикальная красная линия - наблюдение МУВ. . . .	236
6.17	Продолжение Рис. 6.16. . . . .	237
6.18	Продолжение Рис. 6.16. . . . .	238
6.19	Параметры плазмы и магнитного поля в солнечном ветре с очень маленькой концентрацией 10-12.05.1999 г. по наблюдениям на спутниках <i>WIND</i> и <i>ИНТЕРБОЛ-1</i> : панели сверху вниз - плотность (данные <i>ИНТЕРБОЛ-1</i> умножены на 10), переносная и тепловая скорости, модуль магнитного поля. . . . .	240
6.20	Временной ход глобального индекса геомагнитной активности $D_{st}$ для интервала прихода магнитного облака 10-11.01.1997 г. . . . .	241

6.21	Временной ход авроральных индексов геомагнитной активности <i>Contracted Oval</i> , <i>Standard Oval</i> и <i>Expanded Oval</i> для интервала прихода магнитного облака 10-11.01.1997 г.: Рис 6.21 - для 10.01.1997; Рис 6.22 - для 11.01.1997. . . . .	242
6.22	Продолжение Рис. 6.21 для 11.01.1997. . . . .	243
6.23	Наблюдаемые значения числа активаций $N_a$ и минимального значения $D_{st}$ индекса для периодов прихода магнитных облаков (темные кружки и сплошная линия) и магнитных бурь (светлые кружки и штриховая линия). . . . .	246
6.24	Положения магнитопаузы по наблюдениям на спутнике <i>ИНТЕРБОЛ-1</i> во время прихода магнитных облаков: а - в системе координат $XR_{YZ}$ , б - в системе координат $YZ$ . . . . .	247
6.25	Сравнение измеренных положений магнитопаузы с моделями [218] (кружки) и [219] (ромбы). Положительное расстояние соответствует случаю, когда магнитопауза ближе к Земле, чем предсказано моделью. . . . .	248
6.26	Положение головной ударной волны Земли для интервала прихода солнечного ветра с очень маленькой концентрацией 10-12.05.1999 г. по наблюдениям на КА <i>ИНТЕРБОЛ-1 (I-1)</i> , <i>WIND</i> , <i>GEOTAIL (GE)</i> и модельным расчетам [231, 105, Spreiter et al., 1966; Fairfield, 1971] (см. текст). . . . .	251
6.27	Изменение энергетической спектрограммы ионов во время 3 последовательных витков спутника <i>ИНТЕРБОЛ-1</i> 05-15.01.1997 г. . . . .	252
6.28	Изменение энергетической спектрограммы электронов во время 3 витков спутника <i>ИНТЕРБОЛ-2</i> 10-12.01.1997 г. . . . .	254

## Список таблиц

1.1	Характеристики атмосферы Солнца и солнечного ветра . . . . .	21
1.2	Структуры атмосферы Солнца и их характеристики . . . . .	23
1.3	Химический состав Солнца и солнечного ветра . . . . .	24
2.1	Параметры орбит спутников <i>Прогноз 7, 8, 10, 11 и 12</i> . . . . .	49
2.2	Основные технические характеристики датчиков приборов СКС-04, МОНИТОР и БИФРАМ. . . . .	51
2.3	Область определения и точность измерения физических параметров с помощью прибора СКС-04 . . . . .	76
3.1	Средние параметры солнечного ветра по данным ИСЗ <i>Прогноз 7</i> (ноябрь 1978 - июль 1979) и <i>ISEE 3</i> (август 1978 - февраль 1980) . . . . .	79
3.2	Время регистрации межпланетных ударных волн (IS) и геомагнитных возмущений (SSC) в период работы ИСЗ <i>Прогноз 7</i> . . . . .	79
3.3	Относительное содержание $\alpha$ -частиц в солнечном ветре. . . . .	81
3.4	Средние значения отношения массовых скоростей $\alpha$ -частиц и протонов солнечного ветра . . . . .	88
3.5	Средние значения отношения кинетических температур $\alpha$ -частиц и протонов солнечного ветра . . . . .	90
3.6	Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости температуры протонов солнечного ветра от скорости и/или плотности кинетической энергии, а также от гелиоцентрического расстояния . . . . .	100
3.7	Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости концентрации солнечного ветра от скорости и гелиоцентрического расстояния . . . . .	102
3.8	Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости относительной концентрации $\alpha$ -частиц солнечного ветра от скорости, величины потока и температуры. . . . .	105
4.1	Интервалы наблюдений различных типов течений солнечного ветра в период работы ИСЗ <i>Прогноз 7</i> . . . . .	146
4.2	Интервалы наблюдений 4 и 5 типов потоков солнечного ветра в период работы ИСЗ <i>Прогноз 7</i> . . . . .	147
4.3	Средние параметры плазмы и ММП в 5 типах течений солнечного ветра . . . . .	148

5.1	Потоки массы, импульса, энергии и отношения теплового и магнитного давления солнечного ветра по измерениям на разных космических аппаратах. . . . .	160
5.2	Аппроксимация параметров в пяти типах течений солнечного ветра для Рис. 5.8-5.15 . . . . .	166
5.3	Схематическое представление зависимостей, показанных на Рис. 5.8-5.15 . . . . .	175
5.4	Сравнение физических процессов в разных типах солнечного ветра	180
5.5	Основные характеристики межпланетной среды в периоды детального изучения потоков тяжелых ионов солнечного ветра .	181
5.6	Содержание ионов гелия, кислорода, кремния и железа в солнечном ветре . . . . .	184
5.7	Ионизационные температуры ионов кислорода, кремния и железа в солнечном ветре . . . . .	185
5.8	Ионный состав и ионизационные температуры потока солнечного ветра 30 апреля 1985 г. в 16.13-16.21 UT . . . . .	204
6.1	Сильные солнечные вспышки с СКЛ и соответствующие им межпланетные явления и минимумы $D_{st}$ индекса . . . . .	223
6.2	Продолжение Табл. 6.1 . . . . .	224
6.3	Характеристики магнитных облаков по наблюдениям на различных космических аппаратах и положение спутника <i>ИНТЕРБОЛ-1</i> . .	239
6.4	Геоэффективность магнитных облаков и их структур . . . . .	245
6.5	Положение границ магнитосферы во время прихода магнитных облаков . . . . .	249