

КАТАЛОГ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
ДЛЯ ПЕРИОДА 1976 – 2000 г.

Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев

Институт Космических Исследований РАН, Москва, E-mail: yermol@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 27 декабря 2007г.

Абстракт

Основной целью данной работы является составление каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра за период наблюдений 1976 – 2000 г. на основе измерений, представленных в базе данных OMNI. Работа включала несколько этапов. Сначала исходная база данных OMNI была дополнена некоторыми ключевыми параметрами солнечного ветра, определяющими тип течения солнечного ветра. К таким расчетным параметрам относятся плазменное отношение b , тепловое NkT и кинетическое mNV^2 давление солнечного ветра, отношение измеренной и ожидаемой температур T/T_{exp} , градиенты скорости и плотности плазмы, а также градиент магнитного поля. Результаты визуализации основных параметров плазмы, определяющих характер течения плазмы солнечного ветра, представлены на сайте ИКИ. Предварительная идентификация основных типов течений солнечного ветра (быстрые FAST и медленные SLOW течения, HCS – Heliospheric Current Sheet, CIR – Corotating Interaction Region, EJECTA (или Interplanetary CME), MC – Magnetic Cloud, SHEATH - область сжатия перед EJECTA/MC, RARE - разреженная область, IS - межпланетная ударная волна) была сделана по заданным пороговым критериям параметров плазмы и межпланетного магнитного поля с помощью программы предварительной идентификации. Окончательная идентификация проводилась путем сопоставления с результатами визуального анализа данных солнечного ветра. В заключение приведены гистограммы распределения и статистические характеристики некоторых параметров различных крупномасштабных типов солнечного ветра.

PACS: 96.50.Uv, 96.50.Qx, 94.30.Lr

1. Введение.

С начала космической эры солнечный ветер постоянно находится в центре внимания многочисленных исследований (См. статьи регулярных выпусков конференций «Solar wind» и, в

частности, последней конференции «Solar wind - 11» в 2005 [1]). Исходя из научных задач, эти исследования условно можно разделить на 2 вида. С одной стороны, гелиосфера представляет собой гигантскую «лабораторную установку», в которой можно изучать динамику намагниченной плазмы солнечного ветра при различных условиях. С другой стороны, солнечный ветер является основным агентом, который переносит возмущение от Солнца к Земле, и поэтому без его изучения невозможно решение широкого круга задач космической погоды. Именно со второй точки зрения будет описан солнечный ветер в настоящей работе.

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный и теоретический материал по вопросам передачи возмущений от Солнца к Земле. Однако проблема количественного описания всей цепочки воздействий и, главное, предсказания состояния магнитосферы Земли на основе наблюдений Солнца еще далека от своего решения (см., например, последние работы на эту тему [2,3] и ссылки в них). Прежде всего, это связано со сложностью построения математической модели, описывающей сложную систему, включающую в себя цепочку плазменных областей (солнечная атмосфера, межпланетная среда, магнитосфера), где доминируют разные физические процессы, граничные и начальные условия для которых в настоящее время еще не до конца изучены. Кроме того, необходимо учитывать, что часть явлений рождается в солнечной атмосфере, а часть - в результате динамических процессов в межпланетной среде. В этих условиях большое значение приобретают упрощенные подходы, описывающие вместо динамики всей совокупности физических параметров вероятность последовательности отдельных «типичных» явлений, проявляющихся в характерном наборе этих параметров, что в ряде случаев позволяет выявлять доминирующие физические связи и строить прогностические схемы для системы "Солнце-солнечный ветер-геомагнитосфера".

Несмотря на то, что параметры солнечного ветра испытывают большие и быстрые вариации, экспериментально было установлено, что на характерных масштабах от ~ 1 солнечного радиуса (700 тыс. км) до ~ 1 а.е. (150 млн. км) 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 или изменяются по некоторым известным законам), 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, несколько меньше, чем характерные размеры потоков солнечного ветра, связанных 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. Поэтому в настоящей работе мы описываем созданный нами каталог крупномасштабных типов солнечного ветра и некоторые предварительные результаты, полученные с его помощью.

При классификации типов течений солнечного ветра используется, как имеющийся мировой опыт, так и оригинальная методика [4,5,6]. Указанная методика позволяет по имеющемуся в базе OMNI набору параметров надежно идентифицировать 3 типа квазистационарных течений солнечного ветра (гелиосферный токовый слой, быстрые течения из корональных дыр и медленные течения из корональных стримеров) и 5 возмущенных типа (области сжатия перед набегающим быстрым течением (CIR) и межпланетные проявления выбросов корональной массы, которые могут включать магнитные облака MC и EJECTA с предшествующей им областью сжатия SHEATH). Кроме того, мы включили в каталог такие довольно редкие явления, как прямая и обратная ударная волна, и область разрежения RARE, когда в отличие от CIR и SHEATH перед MC/Ejecta за быстрым потоком наблюдается медленный (однако на настоящем этапе мы не выделяли подклассы RARE после быстрого потока или после быстрого MC/Ejecta). Все эти типы солнечного ветра наиболее часто используются в подобного рода исследованиях и ниже (см. раздел 2.1) описываются более подробно. Необходимо отметить, что существуют и более разработанные системы классификации типов солнечного ветра, включающие большее число типов солнечного ветра (см., например, [7,8] и

ссылки в них), однако мы ограничились тем минимумом явлений, которые обычно рассматриваются в исследованиях по солнечно-земной физике.

Создание подобных каталогов является крайне важным этапом исследований по солнечно-земной физике (см., например, каталог магнитных облаков МС по данным спутника *WIND* http://lepmfi.gsfc.nasa.gov/mfi/mag_cloud_publ.html, http://star.mpae.gwdg.de/cme_effects/, а также с каталог *ISTP Solar Wind Catalog* на сайте http://www-spof.gsfc.nasa.gov/scripts/sw-cat/Catalog_events.html или бельгийский каталог <http://sidc.oma.be/cactus/> солнечных событий CME (выбросов корональной массы), сделанный по снимкам коронографа со спутника *SOHO* <http://lasco-www.nrl.navy.mil/>, и их проявлений в межпланетной среде), так как разные типы течений солнечного ветра характеризуются разной степенью воздействия на магнитосферу, или геоэффективностью [2,3,6,9-12]. Однако недостатками существующих подходов являются:

1. анализ лишь отдельных цепочек явлений (например, только выбросов корональной массы и их проявлений в межпланетной среде [13,14] или только CIR [12]),
2. исследование не непрерывных рядов солнечного ветра, а лишь тех межпланетных явлений, которые или являются следствием некоторых событий на Солнце, или являются причинами некоторых возмущений в магнитосфере (см. например, работу [3] и ссылки в ней),
3. отсутствие сравнения между собой роли всех типов солнечного ветра в солнечно-земных связях,
4. малая статистика и короткие временные ряды рассматриваемых явлений.

Эти недостатки мы попытались устранить в нашем каталоге, который создавался с 2000 года и претерпел ряд изменений и дополнений на основе полученных данных и приобретенного опыта (с помощью его прототипа были получены некоторые важные результаты [6,15-18]). Мы надеемся, что в настоящем виде (включая и его цифровую версию <ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) каталог, с одной стороны, может оказать помощь коллегам по исследованиям солнечно-земных связей, а с другой стороны, может дополняться и улучшаться коллективными усилиями. Некоторые предложения по дальнейшему развитию каталога представлены в конце статьи.

2. Описание методики

Описание методики включает 3 основных раздела: (1) обзор литературных данных и обоснование того, какие типы солнечного ветра необходимо включить в наш каталог, (2) описание исходной базы OMNI, расчет новых параметров и включение их дополненную базу, визуализация данных, (3) компьютерная и визуальная селекции данных по типам солнечного ветра.

2.1. Принятая классификация типов солнечного ветра

Многочисленные исследования показали, что основные типы крупномасштабных течений солнечного ветра условно можно разделить на квазистационарные и возмущенные течения плазмы [19-24]. Рисунок 1 иллюстрирует 6 типов течений солнечного ветра (некоторые с подтипами), из которых 3 типа (HCS, SLOW, FAST) относятся к квазистационарным событиям и 3 типа с подтипами (CIR/SHEATH, MC/EJECTA, RARE) – к возмущенным течениям.

К квазистационарным течениям солнечного ветра можно отнести гелиосферный токовый слой (Heliospheric Current Sheet – HCS), связанный с секторной структурой солнечного ветра и разделяющий области с направлением ММП к Солнцу и от Солнца [12,25,26]; медленное течение плазмы SLOW, наблюдаемое над экваториальным стримерным поясом, а также быстрое течение плазмы FAST над полярными корональными дырами, в которых преобладают открытые силовые линии [27-31] (см. типы (1), (2), (3) на Рис.1). Кроме одновременной смены знаков компонент магнитного поля B_x , B_y событие HCS характеризуется наблюдением холодной плазмы с низкой скоростью и высокой плотностью, а также понижением величины магнитного поля. Резкой границы между медленным потоком солнечного ветра SLOW и быстрым течением плазмы FAST нет, как нет резкой границы в топологии коронального магнитного поля при переходе от областей с низкой расходимостью силовых линий магнитного поля к областям с открытыми силовыми линиями. Поэтому границу между медленным течением ветра SLOW и быстрым FAST можно провести условно. Например, медленной плазмой мы считали потоки со скоростью $V < 450$ км/с, а к быстрому

течению плазмы FAST относили солнечный ветер со скоростью $V \geq 450$ км/с. Отметим, что медленное течение плазмы SLOW представляет собой более плотный и холодный солнечный ветер, чем горячий, разреженный высокоскоростной поток FAST [31,32].

Крупномасштабные возмущения солнечного ветра могут быть связаны как с крупномасштабным возмущением на Солнце, так и с возмущением, рожденным в межпланетной среде. К первому типу относятся явления, первоначально получившие название «поршня», но в дальнейшем связанные с выбросами корональной массы (Coronal Mass Ejection – CME): магнитные облака (Magnetic cloud – MC) и EJECTA (или interplanetary coronal mass ejections – ICME) [11,12,33-41] (см. Рис.1, тип течения (5)). События MC и EJECTA имеют магнитное поле в виде жгута, и в них магнитное давление преобладает над тепловым давлением ($\beta \ll 1$). Строго говоря, MC является подклассом EJECTA и отличается более высоким и более регулярным магнитным полем, при этом наблюдательные различия могут быть связаны, как с силой CME на Солнце, так и траекторией космического аппарата относительно оси магнитного жгута в MC/EJECTA [33,37-39,42]. Существуют, по крайней мере, 2 причины выделения MC в отдельный класс: (1) Исторически из-за приборных ограничений по чувствительности именно «наиболее сильные» EJECTA, т.е. MC, были впервые выделены в солнечном ветре и сопоставлены с CME; (2) именно с MC связаны наиболее сильные магнитные бури на Земле. Хотя различия между MC и EJECTA достаточно условны (у MC более сильное и регулярное магнитное поле, чем у EJECTA), мы, следуя традиции, выделили из EJECTA подкласс MC и рассматриваем его отдельно [33,34,37,42].

Если крупномасштабный объем плазмы с вмороженным магнитным полем догоняет более медленный объем плазмы, то на их границе образуется область сжатия, где плазма имеет повышенные значения плотности, температуры и величины поля, а $\beta > 1$. В солнечном ветре такой сценарий реализуется в двух случаях. (1) Когда быстрый MC/EJECTA движется в более медленном солнечном ветре, то перед ним образуется область сжатия, получившая название SHEATH, причем при определенных условиях на переднем крае SHEATH может образовываться межпланетная ударная волна [9,43,44,] (то есть, область SHEATH часто сопровождает событие MC/EJECTA). (2)

Роль своеобразного «поршня» может сыграть и быстрый поток солнечного ветра при наличии достаточно большого градиента скорости (dV/dt), при этом образуется область, получившая название «Corotating Interaction Region (CIR)» в силу того, что, как правило, быстрые потоки образуются в долгоживущих корональных дырах и демонстрируют коротацию, т.е. со-вращение с Солнцем, и появление с периодичностью солнечного оборота 27 суток [10,45] (см. Рис.1, тип (4)). Хотя общий принцип формирования SHEATH и CIR одинаков, они отличаются не только видом образующих их «поршней», но и рядом наблюдательных фактов [46-48]. В связи с тем, что в отличие от MC/EJECTA у CIR граница раздела между быстрым и медленным потоками наклонена под небольшим углом к радиальному направлению, у CIR на орбите Земли наблюдается определенная внутренняя структура (в частности, сначала наблюдается возрастание плотности и величины поля, а лишь затем возрастание температуры [12]). А для событий SHEATH эти возрастания наблюдаются почти одновременно. Однако мы в своем каталоге приводим, как CIR, всю область взаимодействия без выделения более мелких подструктур (типа скачков плотности отдельно от скачков температуры).

В солнечном ветре возможна и обратная ситуация, когда быстрый объем плазмы удаляется от медленного, и в этом случае наблюдается область разрежения RARE с $N < 1 \text{ см}^{-3}$ [49,50] (см. Рис.1, тип (6)). Как и в случае с SHEATH и CIR, возможны 2 случая для объема, создающего разрежения: быстрый поток солнечного ветра и MC/EJECTA, но из-за малой статистики и геоэффективности RARE мы в нашем каталоге не стали разделять этот тип на 2 подкласса.

В наш каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра мы включили такие мелкомасштабные явления, как прямая и обратная межпланетные ударные волны IS и ISA [10,36,51-53]. Характерное время наблюдения фронта ударной волны на спутнике составляет порядка 1 минуты, и при среднечасовых значениях используемой базы данных выделить эти границы (и тем более проверить выполнение на них соотношений Ренкина-Гюгонио) в большинстве случаев оказывается невозможным. Тем не менее, мы выполнили этот анализ, так как

межпланетные ударные волны являются естественными границами крупномасштабных типов SHEATH и CIR и часто используются при изучении солнечно-земных связей.

Таким образом, для целей нашего каталога было принято решение о включении 8 типов крупномасштабного течения плазмы солнечного ветра HCS, SLOW, FAST, CIR, SHEATH, EJECTA, MC, RARE, а также 2 типа кратковременных событий, подозреваемых на ударную волну IS, и обратную ударную волну ISA.

2.2. Расчет и дополнение базы OMNI

Исходными данными для определения типов течения солнечного ветра являлась база данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) [54]. База OMNI включает околоземные данные, полученные разными спутниками за период наблюдений с 1963 по 2001 г. База представляет собой компиляцию данных межпланетного магнитного поля (GSE и GSM компоненты), плазменных данных (плотности, скорости и температуры плазмы), потоков энергичных частиц, а также некоторых солнечных индексов (число пятен) и индексов геомагнитной активности (K_p , D_{st} , $C9$ индексы) с 1-часовым усреднением. Подробное описание базы дано на сайте: ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni/old_hourly/ow_data.html [54].

Предварительно исходная база OMNI была дополнена следующими расчетными параметрами солнечного ветра, которые являются ключевыми для идентификации типов течений солнечного ветра:

- 1) отношение теплового давления к магнитному давлению (бета параметр): $b=NkT/(B^2/8p)$, где N , T , B – плотность (см^{-3}), температура ($^{\circ}\text{K}$) плазмы (протонов) и величина магнитного поля (нТ).
- 2) Ожидаемая средняя температура при расширении солнечного ветра, вычисленная на основе зависимости T от скорости: $T_{exp} = (0.031 V - 5.1)^2$ при $V < 500$ км/с и $T_{exp} = (0.51 V - 142)$ при $V \geq 500$ км/с, где V – скорость солнечного ветра [55].
- 3) Отношение измеряемой и ожидаемой температур: T/T_{exp} .

- 4) Кинетическое давление солнечного ветра в нПа: mNV^2 , где N и V – плотность и скорость плазмы.
- 5) Тепловое давление солнечного ветра в нПа: NkT , где N и T – плотность и температура плазмы.
- 6) Корректированный D_{st}^* индекс (нТ), в котором отсутствует вклад динамического давления плазмы солнечного ветра: $D_{st}^* = D_{st} - 0.2(N[\text{см}^{-3}] * V^2[\text{км/с}]^{1/2} + 20)$, где D_{st} – индекс, N и V – плотность и скорость плазмы [56,57].
- 7) Приращения (градиенты) на интервале 6 часов скорости, концентрации и величины магнитного поля DV_6 , DN и DB , соответственно.

Заметим, что поскольку в среднем выполняются соотношения $T_{exp} \sim V^2 \sim 1/N$, то параметр T/T_{exp} оказывается пропорциональным тепловому давлению NkT , однако тепловое давление позволяет более надежно различить HCS и MC/EJETA [2]. Тем не менее, параметр T/T_{exp} удобен для идентификации MC/EJETA, и мы включили его в расширенную базу и использовали при анализе.

Для составления каталога крупномасштабных событий солнечного ветра был выбран период наблюдений с 1976 г по 2000 г, поскольку информация о солнечном ветре за более ранний период времени 1963 – 1975 г была слишком скудной и обрывистой. На рис.2 показана степень покрытия данными плазмы и магнитного поля солнечного ветра для интервала 1976-2000 по базе OMNI. На рисунке видно, что число одновременных измерений плазмы и магнитного поля невелико (область одновременных измерений скорости и модуля магнитного поля составляет 48,7% от полного времени изучаемого интервала 1976-2000 годов) и для некоторых лет не превышает 50% времени. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при сопоставлении некоторых среднегодовых параметров, например, числа событий за год.

2.3. Методика селекции данных

При составлении каталога солнечного ветра использовались два способа выделения отдельных типов течений: идентификация типов солнечного ветра по пороговым критериям и визуальная

идентификация. С этой целью была сделана программная, предварительная поточечная привязка измерений к перечисленным выше типам течений. На основе числовых критериев, накладываемых на параметры плазмы и магнитного поля (см. таблицу 1), мы оценили вероятность, или степень надежности, причисления каждой отдельной 1-часовой точки измерения к тому или иному типу событий. Поскольку достаточно важным является временной ход параметров (например, типы CIR и SHEATH можно различить только по наблюдаемому за ними «поршню»: быстрый ветер или MC/EJESTA), то на следующем этапе мы уточняли вид и длительность каждого типа течений солнечного ветра, идентифицируемого по пороговым критериям. Кроме того, поскольку нас интересуют крупномасштабные явления, то мы в определенной степени «сглаживали» и мелкомасштабные вариации и результатов измерений, и результатов идентификации по пороговым критериям.

В результате такой обработки нами был создан архив графических данных дополненной базы OMNI, состоящий из рисунков с указанными выше ключевыми параметрами солнечного ветра за период времени 1976–2000гг. На рис.3 приведен пример визуализации ключевых параметров солнечного ветра за период 23.04.1989 по 30.04.1989 (панели 1 – 7) и результаты идентификации течений по заданным критериям с учетом весов, указанных в Таблице 1 (панель 8 на рис.3). (Рисунок 3 представляет собой черно-белый вариант цветных графиков, взятых со страниц сайта ИКИ: <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>, <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>. Поэтому он менее нагляден, чем оригиналы, и мы рекомендуем обратиться к данным Интернета.) Как видно на рис.3 (панель 8), сначала идет ветер типа EJESTA, который затем переходит в тип CIR. Надежность идентификации по пороговым критериям этих типов событий близка к 1. Наблюдается взаимодействие 2-х типов событий EJESTA и CIR. Во время EJESTA наблюдается слабая магнитная буря с $Dst < -50$ нТ, а событие CIR вызвало более мощную магнитную бурю с $Dst < -150$ нТ (Рис.3, панель 7). После типа CIR изменения параметров ветра не значительны, и их величины не соответствуют критериям возмущенных типов событий. В этом случае интервал солнечного ветра, следующий за CIR, оценивается по критерию скорости, и относится к быстрому солнечному ветру FAST. Таким

образом, данный интервал времени по параметрам солнечного ветра можно отнести сразу к 2-м типам событий (с разной достоверностью): сначала EJECTA на фоне SLOW, затем CIR на фоне перехода между SLOW и FAST, и в конце просто FAST. Архив размещен в Интернете на сайте ИКИ (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>). В дальнейшем, полученный архив графических данных расширенной базы OMNI использовался для визуальной идентификации разных типов солнечного ветра.

Набор критериев с числовыми значениями параметров, используемых нами при программной идентификации перечисленных типов течения плазмы солнечного ветра (тип солнечного ветра), представлен в таблице 1.

Как следует из Таблицы 1, каждый из 9-ти типов солнечного ветра (см. столбец 2 - Тип СВ) характеризуется своим набором параметров. Количество параметров, используемых для идентификации разных типов, указано в 3-м столбце (P). Например, для идентификации гелиосферного токового слоя (HCS) использовались 5 параметров, пороговые значения которых указаны в соответствующих столбцах (N , V , b , B_x , B_y). В то же время для определения типов SLOW и FAST использовались только 3 параметра – N , V , b . Графические файлы с количеством выполненных критериев по каждому типу событий в каждой точке измерений (тип файла YYYYMMDD.jpg, где YYYY – год, MM – месяц, DD – день) также представлены на сайте ИКИ: <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> и находятся в отдельных директориях по годам с 1976 по 2001 г.

Кроме того, вклад (значимость) каждого из параметров внутри набора, используемого для выделения разных типов солнечного ветра, в определение события может различаться. Поэтому для каждого типа нами был выделен главный параметр критерия отбора, которому приписывался максимальный вес (см. Таблицу 1, главный параметр выделен жирным шрифтом, веса параметров W для каждого типа указаны в соответствующих столбцах). Например, для HCS главным признаком является одновременная смена знака B_x , B_y компонент поля (вес каждого $W=2.5$, см. таблицу 1). Поэтому в тех случаях, когда данные магнитного поля отсутствовали, идентификация типа течения плазмы HCS была невозможна. Для SLOW и FAST основным критерием является

величина скорости плазмы $V < 450$ км/с, или $V \geq 450$ км/с (вес $W = 2.5$, см. табл.1). Для разреженной плазмы или событий RARE главным признаком является очень низкая плотность. Заметим, что для идентификации 3-х типов ветра (быстрый ветер FAST, медленный ветер SLOW, разреженный ветер RARE) необходима информация только о плазменных параметрах, а магнитные данные не требуются вовсе. Предполагалось, что главным признаком CIR, EJECTA и MC является отношение температур T/T_{exp} (для MC еще добавляется и большая величина магнитного поля B). Как показывает практика, параметр b оказывается более надежным для идентификации этих типов течений, однако для его вычисления требуются параметры и плазмы, и поля, и поэтому он чаще отсутствует в базе, чем T/T_{exp} , и поэтому последний параметр был выбран основным для анализа на этом этапе. Для межпланетных ударных волн (события IS и ISA), являющихся границами, необходимо выполнение всех 4-х условий одновременно (то есть, вклад каждого из 4-х параметров в критерий отбора этих событий одинаков, или с равными весами. Отметим, что для идентификации типов CIR, EJECTA, MC, IS, ISA, которые включают критерии магнитного поля, в случае отсутствия магнитных данных использовались только плазменные данные, но идентификация имела меньшую достоверность.

Таким образом, чтобы определить, к какому типу солнечного ветра относится каждая точка измерений, и с какой долей вероятности, было посчитано отношение числа выполняемых критериев с учетом их веса к полному числу критериев (см. Табл.1) тоже с учетом веса. Полученное отношение меняется от 0 (если не выполняется ни один из критериев, указанных в таблице 1) до 1 (если выполняются все пороговые критерии для данного типа события). Таким образом, можно предположить, что все точки измерения, имеющие суммарные относительные веса выше некоторого порогового значения W_p (возможно, разного для каждого типа событий), относятся к заданному типу течения с вероятностью выше порогового значения. После предварительного анализа для выделения разных типов событий были использованы суммарные пороговые значения $W_p \geq 0.6$, кроме событий IS (и ISA), для которых предполагалось $W_p \geq 0.75$, так как необходимо

выполнение всех условий ($W_p=1$ – если есть данные магнитного поля, и $W_p=0.75$ – если данных поля нет, и используются только плазменные данные).

Предварительный анализ показывает, что для 6-ти типов ветра (HCS, SLOW, FAST, CIR, EJECTA, RARE) отбор точек с пороговым весом $W_p \geq 0.6$ означает, что к данному типу мы относим точки, в которых выполняется, как минимум, только основной критерий, но не выполняется ни один из второстепенных критериев. А также точки, для которых, кроме основного критерия, выполняется любое количество дополнительных критериев в пределах, указанных в таблице 1. Для типа IS пороговое значение относительного веса составляет $W_p \geq 0.75$. Это означает, что отбираются только те события, для которых либо выполняются все условия для данного типа (когда есть данные поля), либо выполняются только плазменные условия (когда нет данных поля). Для типа MC выбор суммарного веса $W_p \geq 0.6$ означает, что мы отбираем те точки, в которых, как минимум, выполняются 2 условия: одно из основных условий (высокое поле $B > 10$ нТ или низкое отношение температур $T/T_{exp} < 0.5$) и второстепенное (ограничение на плотность $N < 10$), но не выполняются 3 других второстепенных условия (см. таблицу 1).

В результате обработки (программной и визуальной) были получены файлы поточечной привязки данных базы OMNI к разным типам солнечного ветра (см. нижнюю часть рис.3). А именно, каждую точку измерения можно рассматривать, принадлежащей к любому из 9-ти типов течений (иногда к 2-м типам), но с разной долей вероятности (степенью надежности), зависящей от соответствующего относительного суммарного веса, который рассчитывался для каждого типа течений по своим числовым критериям отбора.

3. Результаты анализа

В этом разделе мы приводим некоторые результаты, характеризующие поведение различных параметров плазмы и магнитного поля в различных типах солнечного ветра. Общая статистика (по числу интервалов) всех визуально идентифицированных событий разных типов представлена в таблице 2, при этом необходимо помнить (см. рис.2), что число имеющихся измерений в году может меняться от года к году приблизительно в 2 раза, и полное число событий необходимо

увеличить приблизительно на 50%. Так как понятие «событие» для быстрых и медленных потоков трудно сформулировать физически однозначно, мы эти типы не включили в те данные, где анализируются события, но они используются там, где определяются параметры по числу измерений. Чаще всего появляются события EJECTA и HCS, более редкими являются события CIR и SHEATH, причем в сумме события EJECTA и MC наблюдались приблизительно в 2 раза чаще, чем CIR, и лишь половина из них имела SHEATH. Реже всего встречаются разреженная плазма RARE и обратная ударная волна ISA. Число этих событий в году меняется в течение всего рассматриваемого интервала времени, и может отличаться на порядок (ср. различие между минимальным и максимальным числом событий в году). Для некоторых событий (например, HCS, MC) стандартное отклонение от среднегодового значения сопоставимо со средним значением.

Численные значения, характеризующие поведение различных параметров плазмы и магнитного поля в различных типах солнечного ветра, представлены в таблице 3. Во 2-й строке таблицы показаны средние длительности и их среднеквадратичные отклонения для различных типов солнечного ветра. Здесь и далее по таблице данные приведены в виде $\langle a \rangle \pm s(a)$, где $\langle a \rangle$ и $s(a)$ означают среднее и среднеквадратичное отклонение величины a . Под этими значениями во 2-й строке таблицы приведены числа событий, по которым проводилось вычисление выше указанных параметров, и эти числа несколько меньше, чем в таблице 2, так как в этом случае (для табл.3) мы взяли лишь те события, которые не начинались и не заканчивались интервалами отсутствия данных по плазме и магнитному полю, т.е. не были «обрезаны» за счет отсутствия данных. Эти числа оказываются еще более заниженными, чем в таблице 2, причем число событий уменьшается приблизительно пропорционально числу событий в таблице 2 и занижается сильнее для тех типов солнечного ветра, у которых длительность событий больше. В остальных (после 2-й строки) строчках таблицы 3 указано число 1-часовых точек, относящихся к данному типу солнечного ветра.

Гистограммы распределения длительностей событий из таблицы 3 представлены на рис.4. Распределения для всех типов имеют резкие границы со стороны коротких длительностей и длительные «хвосты» в области больших длительностей, что приводит к тому, что средние

значения оказываются несколько больше, чем максимумы распределений. Наиболее продолжительными являются типы EJECTA и MC, длительности которых составляют 30 и 28 часов, соответственно. Длительности CIR и RARE составляют около 20 часов, SHEATH – 16 часов, а HCS – около 5 часов. Длительности EJECTA/MC и CIR для событий, приведших к магнитным бурям [17,18,58], оказываются близкими 28.3 ± 12.0 и 19.8 ± 7.7 , соответственно, а для SHEATH почти в 2 раза короче 8.9 ± 4.7 .

Ниже на рис.5 – 14 представлены гистограммы распределений отдельных параметров плазмы солнечного ветра N , V , T , T/T_{exp} , NkT , β , $mNV^2 = P_{dyn}$, магнитного поля B , B_z и D_{st} индекса для всех типов течений солнечного ветра за период времени 1976 – 2000 г.

Наибольшие различия в скорости (Рис.5.) наблюдаются для быстрого FAST и медленного SLOW потоков солнечного ветра в соответствии с их определением (≥ 450 и <450 км/с). Для остальных типов солнечного ветра это различие невелико, они все имеют максимум вблизи 400-450 км/с и хвосты, простирающиеся за 600 км/с.

В отличие от скорости, вариации концентрации больше (см. рис.6, где данные представлены в логарифмическом масштабе), и различия между различными типами потоков заметны. Концентрация в медленных потоках SLOW выше, чем в быстрых потоках FAST. Она также выше в событиях HCS, CIR и SHEATH, чем в EJECTA и MC.

Динамическое давление, как комбинация квадрата скорости и концентрации mNV^2 , меняется похожим со скоростью образом (см. рис.7): высокие значения наблюдаются в быстрых потоках FAST, CIR и SHEATH и низкие значения в HCS, SLOW, EJECTA, MC и RARE.

Поведение температуры протонов (рис.8) близко к поведению скорости: высокая температура наблюдается в FAST, CIR и SHEATH и низкие значения в SLOW, EJECTA, MC, HCS и RARE. Значения относительной температуры T/T_{exp} (рис.9) близко к 1 в невозмущенных типах солнечного ветра FAST, SLOW, выше 1 в сжатых типах CIR и SHEATH и ниже 1 в EJECTA, MC, HCS и RARE.

Тепловое давление солнечного ветра NkT (рис.10) ведет себя по-разному с $T/TeXp$ образом: высокое в CIR и SHEATH и низкое в EJECTA, MC, HCS и RARE.

Модуль межпланетного магнитного поля (рис.11) имеет высокие значения в MC, CIR и SHEATH, средние в FAST, SLOW и EJECTA и низкие в HCS и RARE. Величина ММП является одним из основных параметров, по которому идет селекция MC и EJECTA. Компонента B_z ММП (рис.12) для всех типов солнечного ветра имеет достаточно симметричную форму распределения (с равным числом положительных и отрицательных значений) со средней величиной близкой к нулю. При этом следует обратить внимание, что возмущенные типы HCS, CIR, SHEATH, MC и EJECTA имеют более широкие распределения, а значит, в них более высокая вероятность наблюдать заметную южную компоненту ММП.

Отношение теплового и магнитного давлений (β -параметр, рис.13) имеет более высокие значения в CIR и SHEATH и более низкие в MC и EJECTA.

Индекс D_{st} имеет максимум вблизи интервала от 0 до -20 нТ для всех типов солнечного ветра. Однако для возмущенных типов (имеющих более широкие распределения B_z компоненты ММП (рис.12)) CIR, SHEATH, MC и EJECTA, а также для FAST, распределения имеют длинные хвосты в область низких значений D_{st} индекса, так что средние значения оказываются отличными от нуля.

4. Обсуждение и заключение

Результаты нашей идентификации частично сравнивались с табличными данными разных событий, представленных на сайте http://star.mpae.gwdg.de/cme_effects/, а также с каталогом *ISTP Solar Wind Catalog* на сайте http://www-spof.gsfc.nasa.gov/scripts/sw-cat/Catalog_events.html. Предварительный анализ показал, что сильное расхождение в результатах, например, по выделению ударных волн (IS) и по событиям HCS (до 50%), связано с отсутствием в каталоге либо магнитного поля, либо одновременно и плазменных данных (например, 37 из 47 пропущенных нами событий HCS

объясняются “дырами” в информации). Можно сделать вывод, что главная причина несовпадения - в использовании разных исходных баз данных. В то же время сравнение с каталогом *ISTP Solar Wind Catalog* на сайте http://www-spof.gsfc.nasa.gov/scripts/sw-cat/Catalog_events.html, который составлен по данным спутников WIND и IMP8, показывает очень хорошее совпадение (95-100%) с событиями FAST, SLOW, MC. Таким образом, сравнение наших результатов идентификации с ранее полученными таблицами отдельных типов течений продемонстрировало хорошее соответствие в более, чем 90% случаев, при этом расхождения наблюдались или в условиях отсутствия измерений некоторых параметров, или в условиях, когда наблюдаемое сложное явление имело черты, характерное для нескольких типов течений, и таким образом, не допускало однозначной интерпретации. Например, при взаимодействии между собой двух и более EJECTA/MC образуется достаточно сложное явление, в котором сжатое EJECTA/MC может иметь черты как EJECTA/MC, так и SHEATH, и при этом именно такие явления оказываются гелиосферными источниками наиболее сильных магнитных бурь [59]. В дальнейшем такие интервалы (взаимодействия разных типов течений), по-видимому, следует выделить в отдельные подтипы течений ветра.

Сопоставление полученных нами событий с данными других авторов будет продолжено. Более того, использование нами в дальнейшем более полных данных базы OMNI2 существенно улучшит ситуацию.

Приведенные выше распределения параметров плазмы и магнитного поля в разных крупномасштабных типах солнечного ветра наглядно демонстрируют, что отобранные на основании многочисленных экспериментов граничные значения позволили провести селекцию всех измеренных интервалов солнечного ветра и отнести их к конкретному типу (или нескольким типам, но с различной степенью достоверности идентификации). Важно отметить, что в отличие от многочисленных работ, где подобные граничные подходы использовались для селекции лишь какого-нибудь одного или двух типов течений (см. например, [12,13]), в данной работе этот подход реализован с единым набором критериев для 8 крупномасштабных типов течений, и показано, что

он может надежно работать. Полученные статистические характеристики и гистограммы параметров солнечного ветра и ММП в различных типах течений хорошо согласуются с ранее полученными результатами (см. [60] и ссылки в ней).

В следующей версии нашего каталога мы планируем выделить такого рода явления в отдельный класс. Говоря о дальнейших планах по развитию каталога, мы хотели бы (1) расширить его в область более ранних наблюдений, (2) перейти к версии OMNI2, что позволит расширить каталог в область за 2000 год, (3) включить анализ данных с более высоким временным разрешением для более надежного выделения прямых и обратных межпланетных ударных волн, (4) исследовать влияние порогов на выделение областей разрежения RARE, которые в настоящее время отобраны с достаточно грубым порогом.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI. Данные OMNI получены из GSFC/SPDF OMNIWeb interface на <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Работа поддержана грантами РФФИ N 04-02-16131, 07-02-00042, а также Программой ОФН №16 «Плазменные процессы в солнечной системе».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proceedings of the Solar Wind 11 / SOHO 16, "Connecting Sun and Heliosphere" Conference (ESA SP-592). Held 12 - 17 June 2005, in Whistler, Canada. Edited by B. Fleck, T. H. Zurbuchen and H. Lacoste. Also published on CDRom. ISBN 92-9092-903-0; ISSN 0379-6566 & 1609-042X (CD). Published by ESA Publications Division, ESTEC, Postbus 299, 2200 AG Noordwijk, The Netherlands, 2005.
2. *Yermolaev Yu.I. and M.Yu. Yermolaev* Statistic study on the geomagnetic storm effectiveness of solar and interplanetary events // *Adv. Space Res.* 2006.V. 37. P.1175.
3. *Zhang, J., et al.* Solar and interplanetary sources of major geomagnetic storms ($Dst < -100nT$) during 1996–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V.112. A10102, doi:10.1029/2007JA012321.
4. *Ермолаев Ю.И.* Новый подход к изучению крупномасштабной структуры солнечной короны по результатам измерения параметров солнечного ветра // *Космич. Исслед.* 1990. Т.28. N.6. С.890.
5. *Yermolaev Yu.I.* Large-scale structure of solar wind and its relationship with solar corona: Prognoz 7 observations // *Planet. Space Sci.* 1991. V.39. N.10. P.1351.
6. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976-2000 гг. // *Космич. Исслед.* 2002. Т.40. N.1. С.1.
7. *Иванов К.Г.* Солнечные источники потоков межпланетной плазмы на орбите Земли // *Геомагнетизм и Аэрономия.* 1996. Т.36. N.2. С.19.
8. *Иванов К.Г.* Арочные филаментные системы как солнечные источники околоземных возмущений // *Геомагнетизм и Аэрономия.* 1996. N.1. С.3.
9. *Zhang J., M.W. Liemohn, J.U. Kozyra et al.* A statistical study of the geoeffectiveness of magnetic clouds during high solar activity years // *J. Geophys. Res.* 2004. V.109. A09101, doi:10.1029/2004JA010410, 2004.

10. *Echer E., W.D. Gonsalez, and M.V. Alves.* On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // *Space Weather.* 2006. V.4. S06001, doi:10.1029/2005SW000200
11. *Koskinen H.E.J. and K.E.J Huttunen* Geoeffectivity of coronal mass ejections // *Space Sci. Rev.* 2006. N.124. P.169. DOI: 10.1007/s11214-006-9103-0.
12. *Alves M.V., E. Echer, and W.D. Gonsalez.* Geoeffectiveness of corotating interaction regions as measured by Dst index // *J. Geophys. Res.* 2006. V.111. A07S05, doi:10.1029/2005JA011379
13. *Cane H.V. and Richardson I.G.* Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996 – 2002 // *J. Geophys. Res.* 2003. V.108. A.4. doi 10.1029/2002JA009817.
14. *Zhang J., Dere K.P., et al.* Identification of solar sources of major geomagnetic storms between 1996 and 2000 // *Astrophys. J.* 2003. V.582. P.520.
15. *Ермолаев Ю.И. и Ермолаев М. Ю..* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976 – 2000 гг. 3. // *Космич. Исследов.* 2003. Т.41. N.6. С.574. (Cosmic Research. 2003. V. 41. P. 539.)
16. *Ермолаев Ю.И. и Ермолаев М. Ю.* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976 – 2000 годов. 2. // *Космич. Исследов.* 2003. Т.41. N.2. С.115. (Cosmic Research. 2003. V. 41. P.115.)
17. Ю.И.Ермолаев, М.Ю.Ермолаев, И.Г. Лодкина, **Н.С.Николаева**, Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, *Космич. Исследования*, т.45, N1, С.3-11, 2007.
18. Ю.И.Ермолаев, М.Ю.Ермолаев, И.Г. Лодкина, **Н.С.Николаева**, Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям, 2 часть, *Космич. Исследован.*, т. 45, N6, с.489-498, 2007.
19. *Hundhausen A.J.* Coronal expansion and solar wind // Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag. 1972.
20. *Svalgaard L. et al.* A model combining the polar and the sector structured polar magnetic field // *Sol. Phys.* 1974. V.37. P.157.

21. *Eselevich V.G. and V.G. Fainshtein.* An investigation of the relationship between the magnetic storm Dst indexes and different types of solar wind streams // *Ann. Geophys.* 1993. V.11. P.678.
22. *Eselevich V.G. et al.* Some peculiarities of solar plasma flows from coronal holes // *Planet. Space Sci.* 1990. V.38. P.459.
23. *Yermolaev Yu.I., Stupin V.V.* Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: the Prognoz 7 observations // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. N. A2. P.2125.
24. *Goldstein R., M. Neugebauer, and D. Clay.* A statistical study of coronal mass ejection plasma flows // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103. N.A3. P. 4761.
25. *Gonzalez W.D., et al.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* 1999. V.88. P.529.
26. *Tsurutani D.T. et al.* Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle // *J. Geophys. Res.* 1995. V.100. P.21717.
27. *Krieger A.S. et al.* A coronal hole and its identification as the source of high velocity solar wind stream // *Solar Phys.* 1973. V.29. P.505.
28. *Burlaga L.F., et al.* Sources of magnetic-fields in recurrent interplanetary streams // *J. Geophys. Res.* 1978. V.83. P. 4177.
29. *Sheeley N.R. and J.W. Harvey.* Coronal holes, solar wind streams and recurrent geomagnetic disturbances during 1978 and 1979 // *Sol. Phys.* 1981. V.70. P.237.
30. *Philips J.L. et al.* Ulysses at 50° south: constant immersion in the high speed solar wind // *Geophys. Res. Lett.* 1994. V.21. P.1105.
31. *Schwenn R.* Solar wind sources and their variations over the solar cycle // *Space Sci. Rev.* 2006. N.124. P.51. DOI: 10.1007/s11214-006-9099-5.
32. *Schwenn R. and Marsch E.* (eds) *Physics of inner heliosphere I* // Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 1990. P.99.
33. *Burlaga L.F., E. Sittler, F. Mariani, and R. Schwenn.* Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP 8 observations // *J. Geophys. Res.*, 1981. V. 86. P.6673.

34. *Klein L.W. and L.F. Burlaga.* Interplanetary magnetic clouds at 1 AU // *J. Geophys. Res.* 1983. V.87. P.613.
35. *McComas D.J., Gosling J.T., and Bame S.J.* A test of magnetic field draping induced Bz perturbations ahead of fast coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 1989. V.94. P.1465.
36. *Gosling J.T. et al.* Coronal mass ejections and large geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V.17. P.901.
37. *Burlaga L.F.* Magnetic clouds in *Physics of the Inner Heliosphere*. 1991. V.2. edited by R.Schwenn and E.Marsch, Springer-Verlag, New York, P.1.
38. *Cane M.V., I.G. Richardson,* What caused the large geomagnetic storm of November 1978? // *J. Geophys. Res.* 1997. V.102. N.A8. P. 17445.
39. *Blanco-Cano and S. Bravo.* Solar wind signatures associated with magnetic clouds // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. N. A3. P. 3691.
40. *Schwenn R., A. Dal Lago, E. Huttunen, and W.D. Gonzalez.* The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth // *Annales Geophysicae.* 2005. V. 23. P. 1033.
41. *Gopalswamy N.* Properties of interplanetary coronal mass ejections // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 145. doi: 10.1007/s11214-006-9102-1.
42. *Richardson I.G., and H.V. Cane.* Regions of abnormally low temperature in the solar wind (1965 – 1991) and their association with ejections // *J. Geophys. Res.* 1995. V.100. N.A12. P.23397.
43. *Bravo S. and X. Blanco-Cano.* Signatures of interplanetary transients behind shocks and their association with interplanetary clouds // *Annal. Geophys.* 1998. V. 16. P. 359.
44. *Wu C.-C. and R.P. Lepping.* Effects of magnetic clouds on the occurrence of geomagnetic storms: The first 7 years of Wind // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. N. A10. P. 1314. doi:10.1029/2001JA000161.
45. *Smith E.J. and J.H. Wolfe.* Observations of interaction regions and corotating shocks between one and five AU: Pioneers 10 and 11 // *Geophys. Res. Lett.* 1976. V. 3. P. 137.

46. *Tsurutani B.T., W.D. Gonzalez, E.Tang, S.I. Akasofu, and E.J. Smith.* Origin of interplanetary southward magnetic fields responsible for major magnetic storms near the solar maximum (1978-1979) // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 8519.
47. *Gosling J.T., and V.J. Pizzo.* Formation and evolution of corotating interaction regions and their three dimensional structure // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 89. P. 21.
48. *Richardson I.G., H.V. Cane, E.W.Cliver,* Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles // *J. Geophys. Res.* 2002. V.107. N.8. 10.1029/2001JA000504.
49. *Richardson I.G., D. Berdichevsky, et al.* Solar cycle variation of low density solar wind during more the three solar cycles // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. N. 23. P. 3761.
50. *Ермолаев Ю.И., Г.Н. Застенкер, Н.С. Николаева.* Реакция магнитосферы Земли на события в солнечном ветре по данным проекта ИНТЕРБОЛ // *Космич. Исследов.* 2000. Т.38. N.6. С.563. (Cosmic Research. 2000. V. 38. N. 6. P. 527.)
51. *Sonett C.P. and D.S. Colburn.* The SI⁺ - SI⁻ pair and interplanetary forward reverse shock ensemble // *Plan. Space Sci.* 1965. V. 13. P. 675.
52. *Richardson I.G., H.V. Cane.* Signatures of shock drivers in the solar wind and their dependence on the solar source location // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. N. A9. P. 15295.
53. *Ho C.M. et al.* A pair of forward and reverse slow-mode shocks detected by Ulysses at 5 AU // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N. 14. P. 2613.
54. *King J.H. and N.E. Papitashvili.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 110. N. A2. A02209, 10.1029/2004JA010804.
55. *Lopez R.E.* Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships // *J. Geophys. Res.* 1987. V.92. P.11189.
56. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204.

57. *Gonzalez W.G., J.A. Joselyn, Y. Kamide, et al.* What is a geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. P. 5771.
58. *Yermolaev, Yu. I. Yermolaev, M. Yu., Lodkina I. G.* Comment on "A statistical comparison of solar wind sources of moderate and intense geomagnetic storms at solar minimum and maximum" by Zhang, J.-C., M. W. Liemohn, J. U. Kozyra, M. F. Thomsen, H. A. Elliott, and J. M. Weygand // *J. Geophys. Res.* 2006. <http://arxiv.org/abs/physics/0603251>.
59. *Yermolaev, Y. I., and M. Y. Yermolaev.* Comment on "Interplanetary origin of intense geomagnetic storms ($Dst < -100$ nT) during solar cycle 23" by W. D. Gonzalez et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. doi:10.1029/2007GL030281.
60. *Ермолаев Ю.И. Ступин В.В.* Потоки энергии, импульса и массы из Солнца в разных типах течений солнечного ветра по наблюдениям на спутнике Прогноз-7. // *Космич. Исслед.* 1992. Т. 30. N. 6. С. 833.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Схематическое представление крупномасштабных типов солнечного ветра. Цифрами обозначены:(1) гелиосферный токовый слой (HCS),(2) медленные течения из корональных стримеров (SLOW),(3) быстрые течения из корональных дыр (FAST), (4) сжатая плазма (на фронте быстрого и медленного течений – CIR и перед передним фронтом поршня – SHEATH),(5) поршень

(магнитные облака – MC, и “поршни” – EJECTA), (6) разреженная плазма на фронте медленного и быстрого течений солнечного ветра (RARE).

Рис.2. Годовые распределения количества 1-час данных с одновременными измерениями 3-х параметров (N , V , T) плазмы (крестики), величины и 3-х компонент магнитного поля (B , B_x , B_y , B_z) (ромбики) и всех 7-ми параметров (3-х параметров плазмы и 4-х параметров магнитного поля) (точки) за период 1976 – 2001 год по базе OMNI. Горизонтальная пунктирная линия показывает максимальный 100% уровень данных в году.

Рис.3. Пример визуализации ключевых параметров солнечного ветра модифицированной базы OMNI для временного интервала 23-30 апреля 1989г. Сверху вниз показаны: 1-я панель - β (beta) параметр, T/T_{ex} , NkT (нПа); 2-я панель – B , B_z и градиент поля DB (нТ); 3-я панель – T и T_{ex} (°К); 4-я панель – $N(\text{см}^{-3})$, $mNV^2(\text{нПа})$ и градиент плотности $DN(\text{см}^{-3})$; 5-я панель – V , градиент скорости DV_6 ; 6-я панель – K_p индекс; 7-я панель – D_{st} и D_{st}^* индексы (нТ). Последняя 8-я панель: идентификация типов течений солнечного ветра по заданным критериям (см. текст).

Рис.4. Распределение длительностей различных типов солнечного ветра: верхняя панель (HCS), нижняя панель (CIR, EJECTA, MC, SHEATH, RARE)- для периода 1976-2000гг.

Рис.5. То же, что на рис.4, для скорости солнечного ветра V .

Рис.6. То же, что на рис.4, для концентрации солнечного ветра N .

Рис.7. То же, что на рис.4, для динамического давления солнечного ветра mNV^2 .

Рис.8. То же, что на рис.4, для температуры протонов солнечного ветра T .

Рис.9. То же, что на рис.4, для относительной температуры протонов солнечного ветра T/T_{exp} (T_{exp} – температура, оцененная по измеренной скорости солнечного ветра на базе средней зависимости температуры от скорости)

Рис.10. То же, что на рис.4, для теплового давления солнечного ветра NkT .

Рис.11. То же, что на рис.4, для модуля межпланетного магнитного поля B .

Рис.12. То же, что на рис.4, для B_Z компоненты межпланетного магнитного поля

Рис.13. То же, что на рис.4, для отношения теплового и магнитного давлений (β -параметр)

Рис.14. То же, что на рис.4, для D_{st} индекса

Таблица 1. Набор критериев, используемых для идентификации разных типов течений солнечного ветра.

Таблица 2. Статистика визуально отобранных событий (число интервалов) за весь период времени 1976 – 2000 г.

Таблица 3. Средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров в различных типах солнечного ветра за 1976-2000 годы.

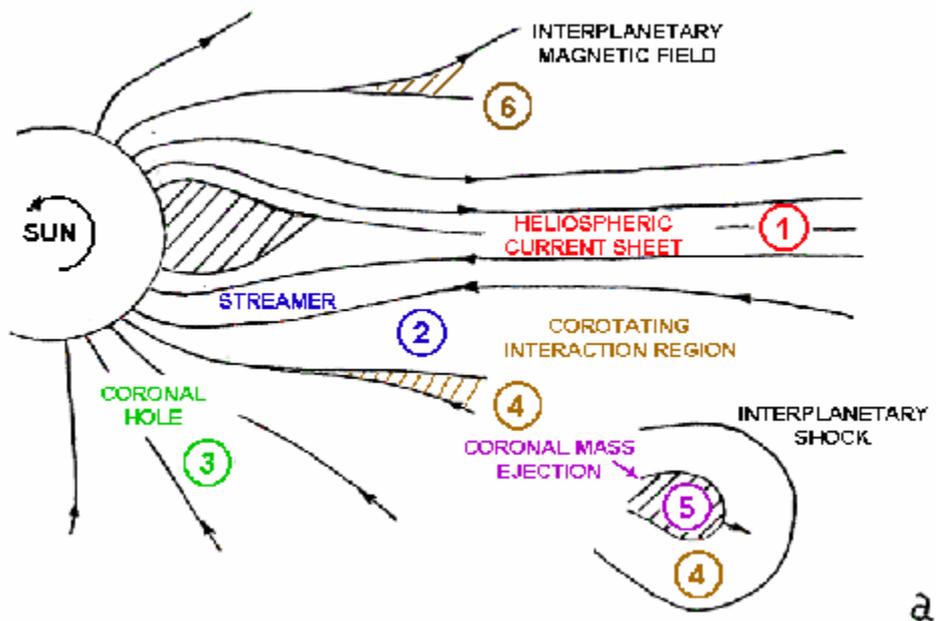


Рис.1. Схематическое представление крупномасштабных типов солнечного ветра. Цифрами обозначены: (1) гелиосферный токовый слой (HCS), (2) медленные течения из корональных стримеров (SLOW), (3) быстрые течения из корональных дыр (FAST), (4) сжатая плазма (на фронте быстрого и медленного течений – CIR и перед передним фронтом поршня – SHEATH), (5) поршень (магнитные облака – MC, и “поршни” – EJECTA), (6) разреженная плазма на фронте медленного и быстрого течений солнечного ветра (RARE).

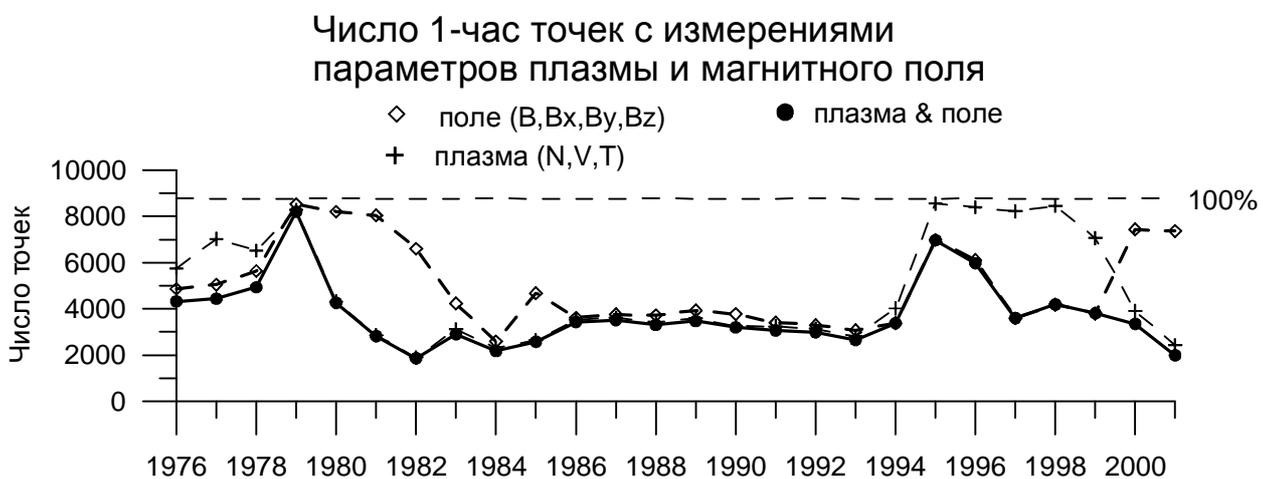


Рис.2. Годовые распределения количества 1-час данных с одновременными измерениями 3-х параметров (N, V, T) плазмы (крестики), величины и 3-х компонент магнитного поля (B, B_x, B_y, B_z) (ромбики) и всех 7-ми параметров (3-х параметров плазмы и 4-х параметров магнитного поля) (точки) за период 1976 – 2001 год по базе OMNI. Горизонтальная пунктирная линия показывает максимальный 100% уровень данных в году.

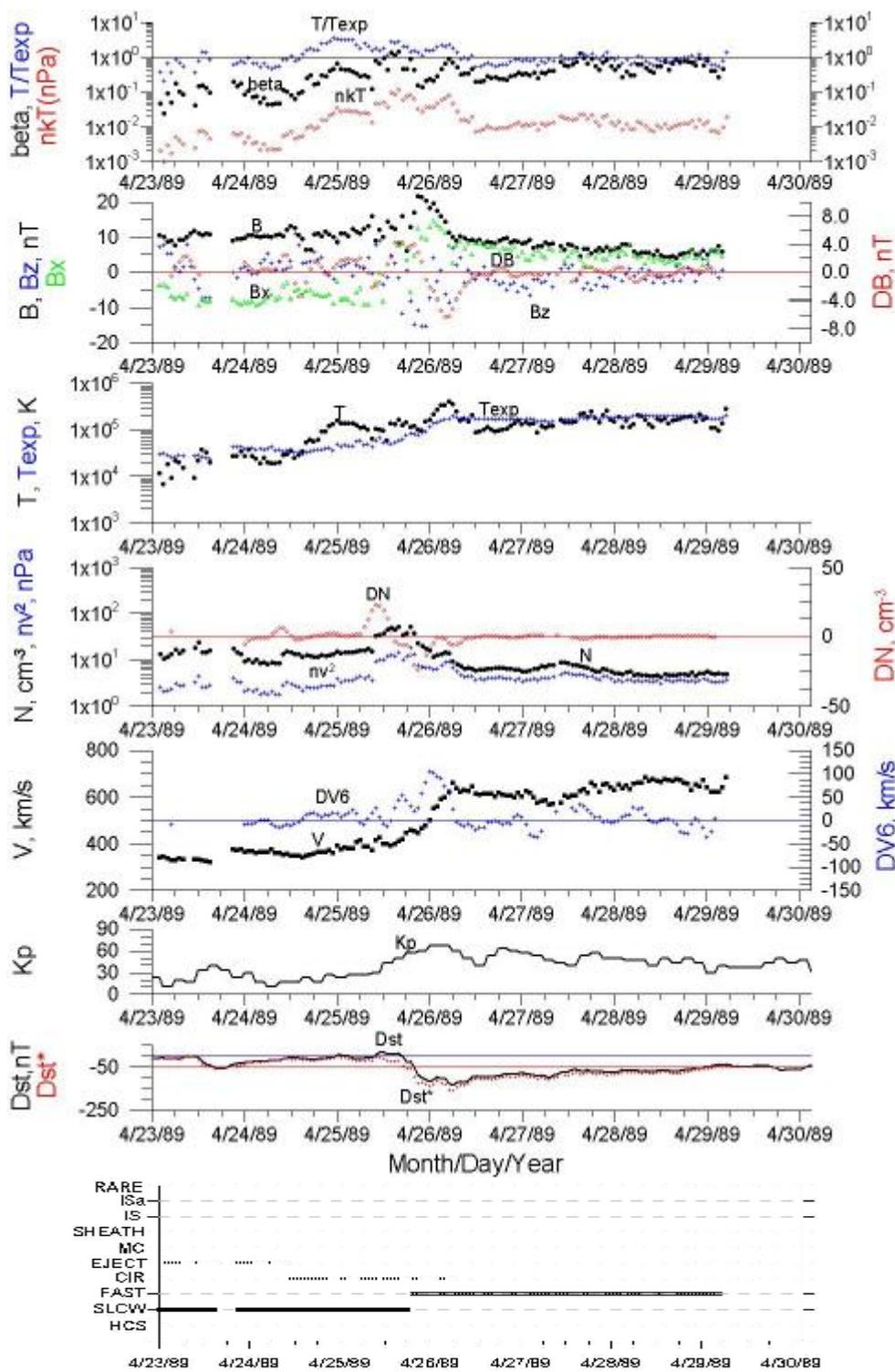


Рис.3. Пример визуализации ключевых параметров солнечного ветра модифицированной базы OMNI для временного интервала 23-30 апреля 1989г. Сверху вниз показаны: 1-я панель - β (beta) параметр, T/T_{exp} , NkT (нПа); 2-я панель - B , B_z и градиент поля DB (нТ); 3-я панель - T и T_{exp} ($^{\circ}K$); 4-я панель - N (cm^{-3}), nV^2 (нПа) и градиент плотности DN (cm^{-3}); 5-я панель - V , градиент скорости DV_6 ; 6-я панель - K_p индекс; 7-я панель - D_{st} и D_{st}^* индексы (нТ). Последняя 8-я панель: идентификация типов течений солнечного ветра по заданным критериям (см. текст).

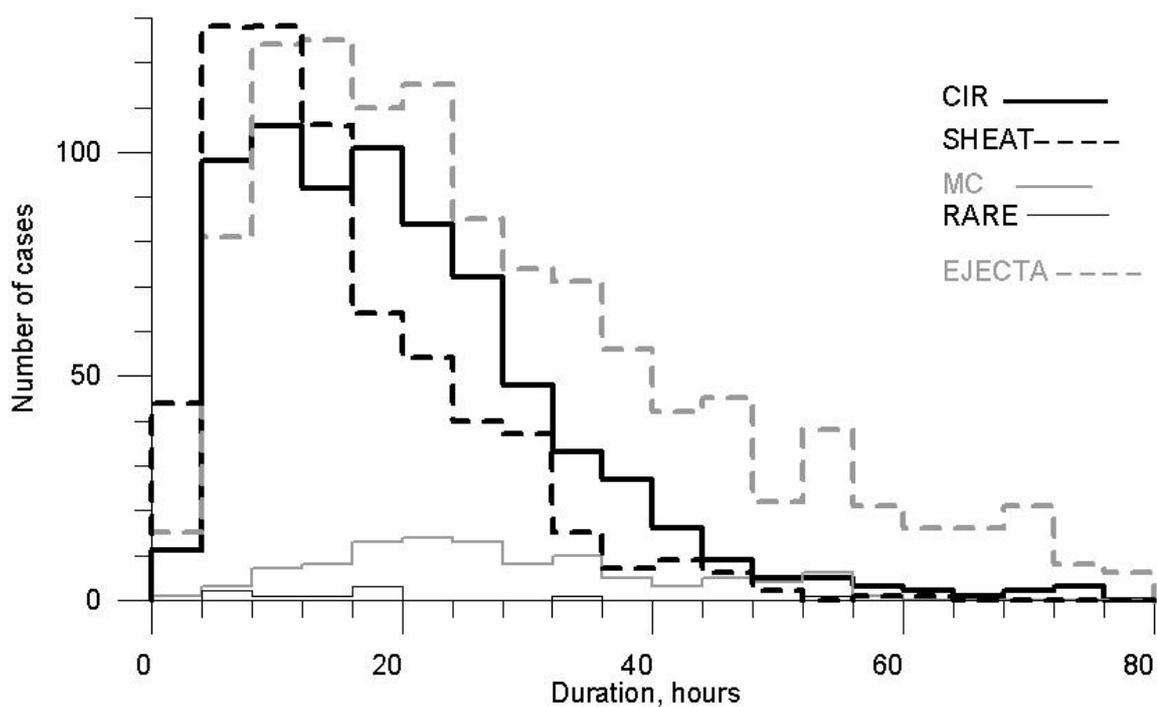
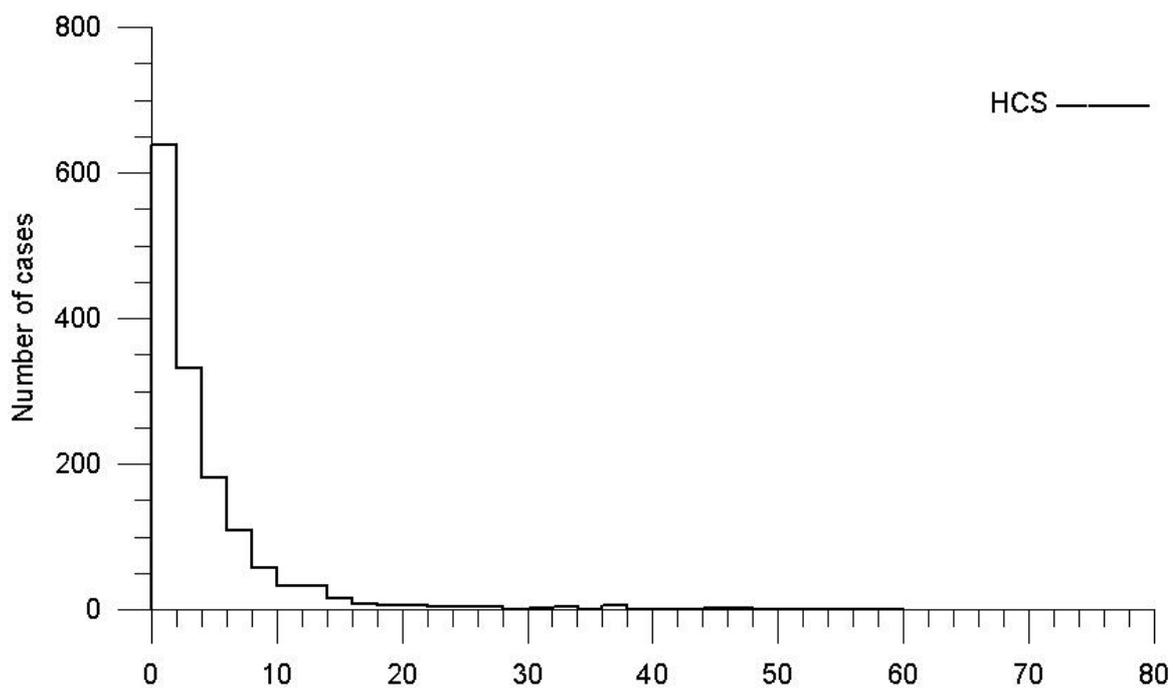


Рис.4. Распределение длительностей различных типов солнечного ветра: верхняя панель (HCS), нижняя панель (CIR, EJECTA, MC, SHEATH, RARE)- для периода 1976-2000гг.

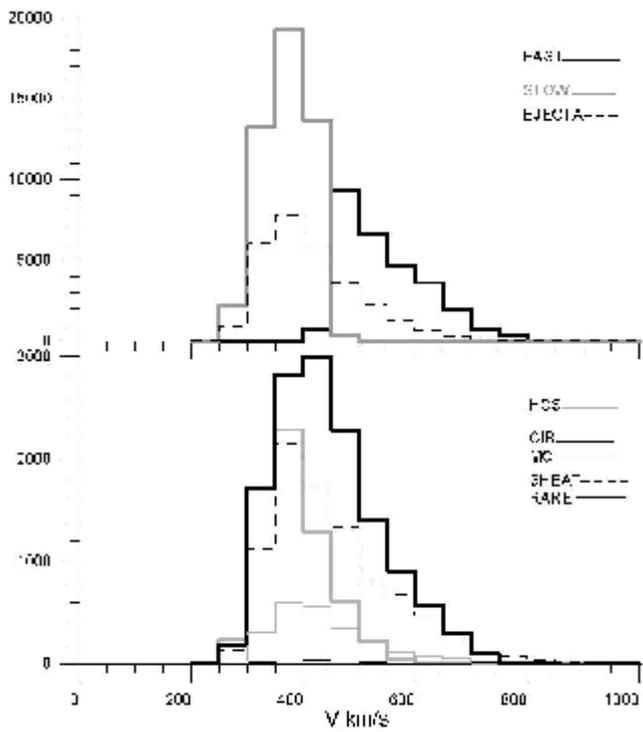


Рис.5. То же, что на рис.4, для скорости солнечного ветра V .

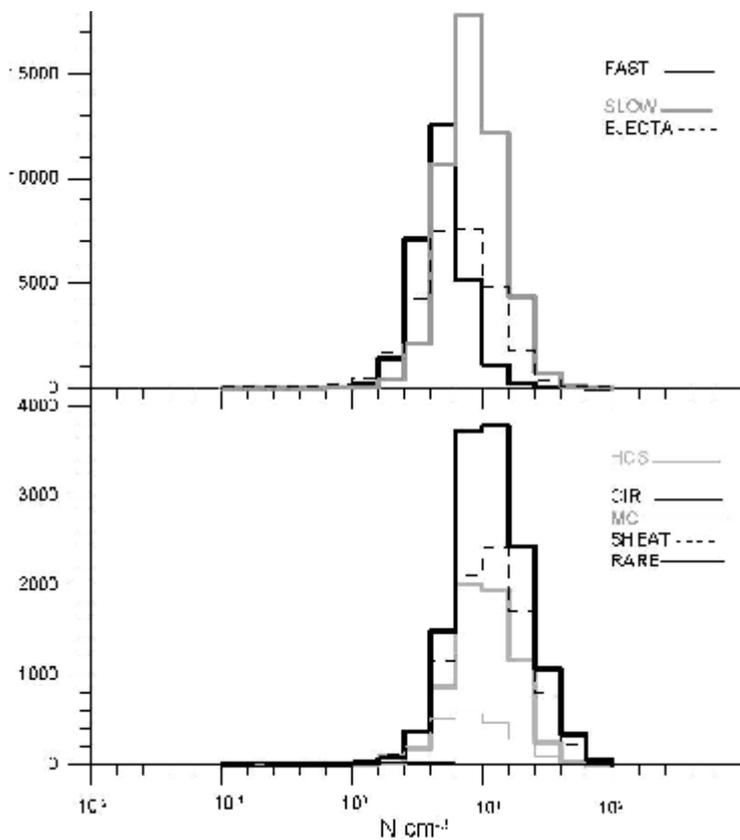


Рис.6. То же, что на рис.4, для концентрации солнечного ветра N .

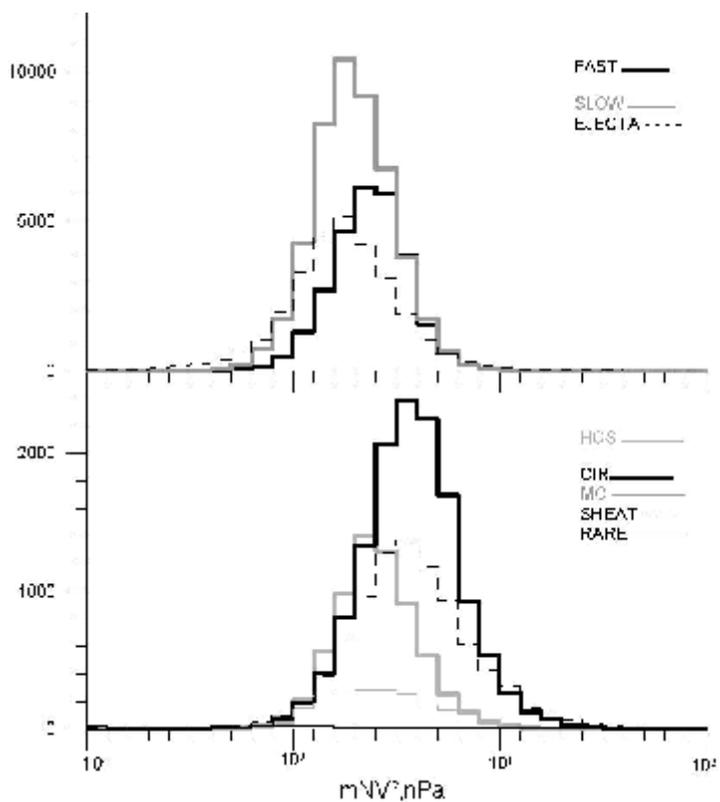


Рис.7. То же, что на рис.4, для динамического давления солнечного ветра mNV^2 .

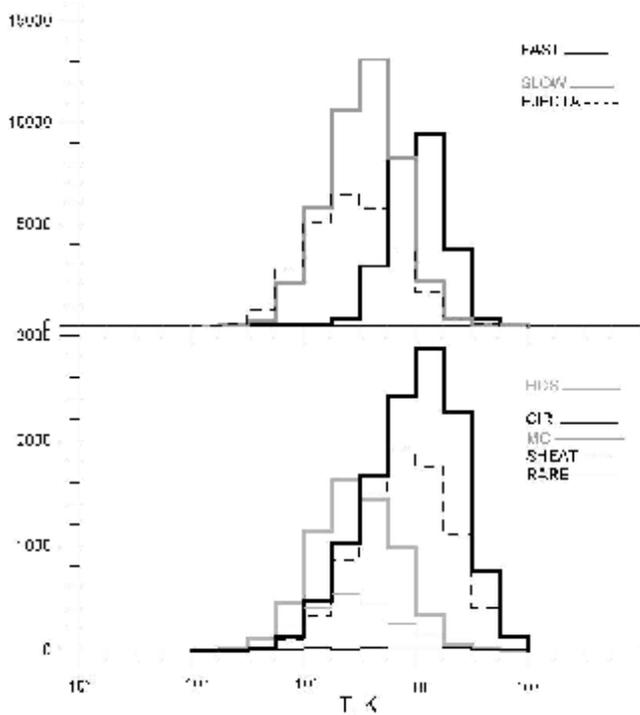


Рис.8. То же, что на рис.4, для температуры протонов солнечного ветра T .

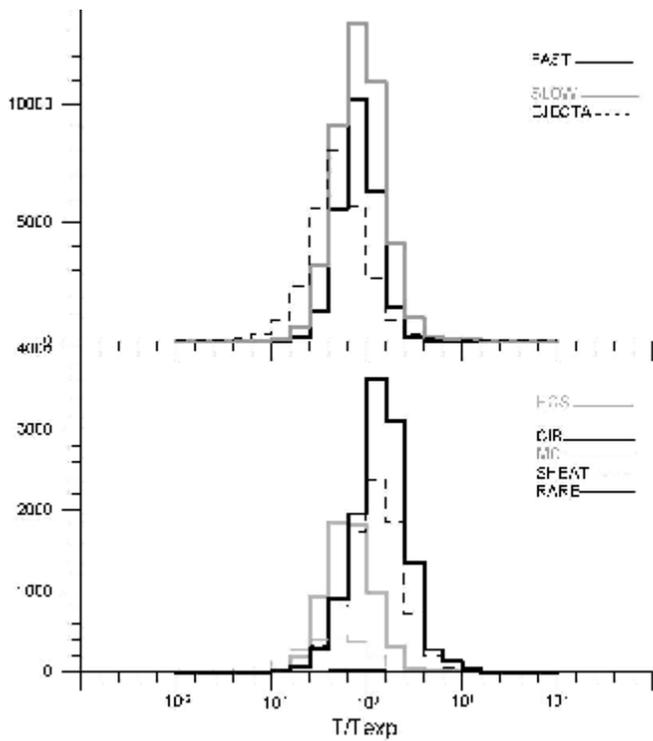


Рис.9. То же, что на рис.4, для относительной температуры протонов солнечного ветра T/T_{exp} (T_{exp} – температура, оцененная по измеренной скорости солнечного ветра на базе средней зависимости температуры от скорости)

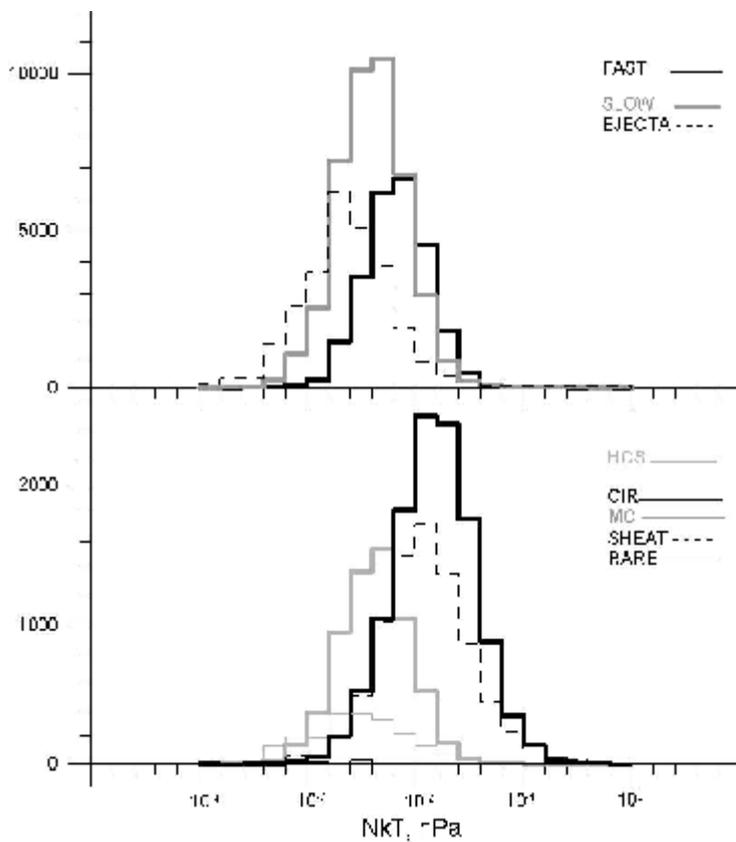


Рис.10. То же, что на рис.4, для теплового давления солнечного ветра NKT .

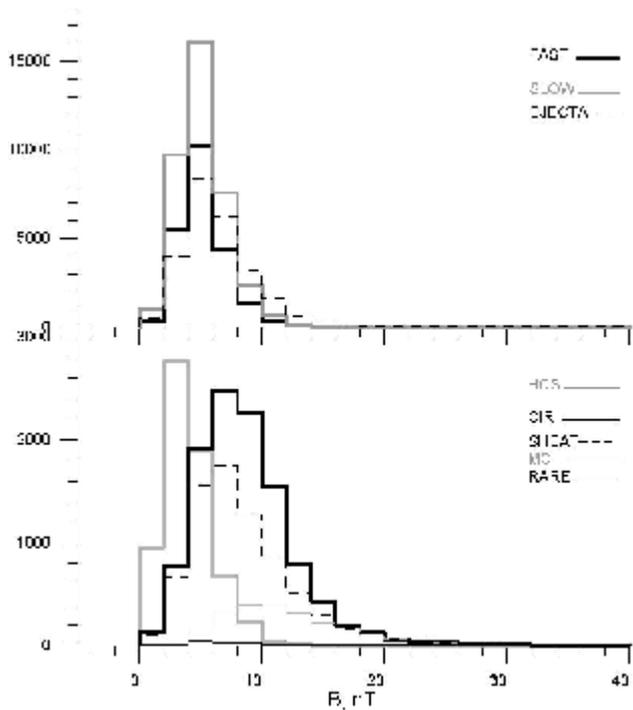


Рис.11. То же, что на рис.4, для модуля межпланетного магнитного поля B .

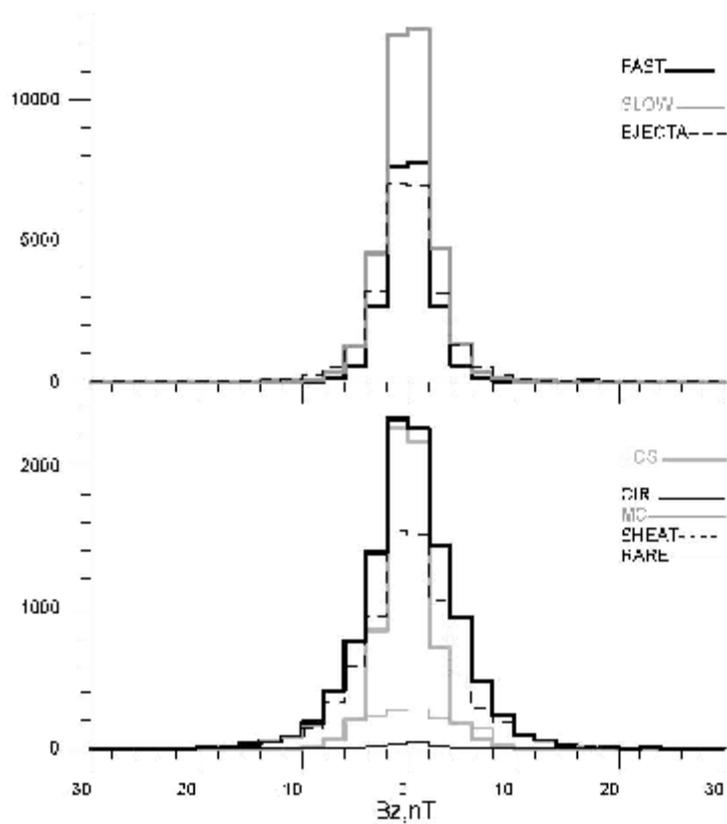


Рис.12. То же, что на рис.4, для B_z компоненты межпланетного магнитного поля

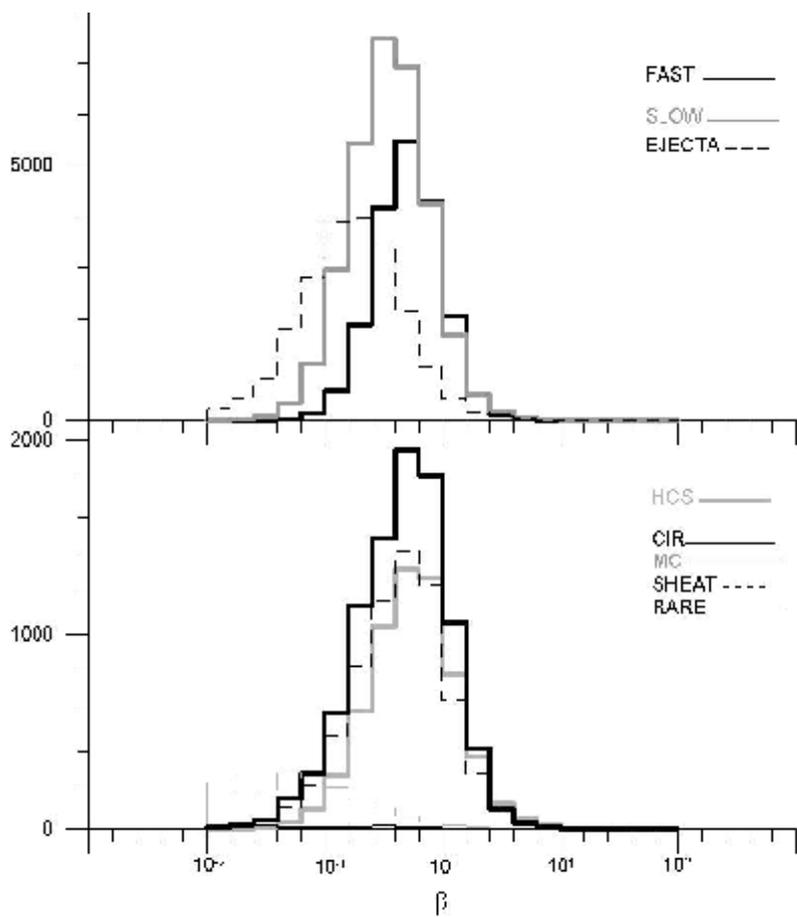


Рис.13. То же, что на рис.4, для отношения теплового и магнитного давлений (β -параметр)

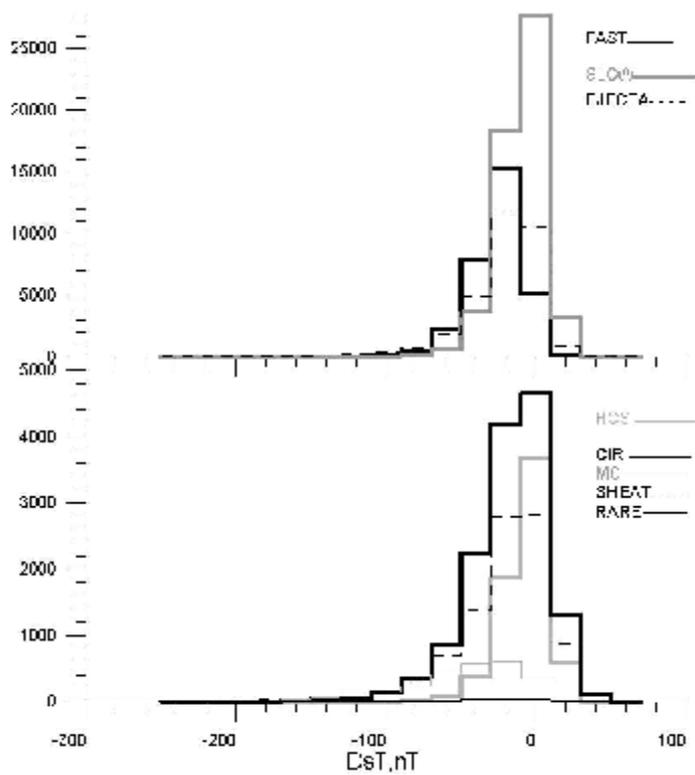


Рис.14. То же, что на рис.4, для D_{st} индекса

Таблица 1. Набор критериев, используемых для идентификации разных типов течений солнечного ветра.

| № | Тип СВ | P | N W | V W | B W | T/Texp W | NkT W | β W | DV6 W | DN W | DB W | Bx W | By W | T W |
|---|--------|---|-----------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------|--------------|-------------|------------|------------|---------|---------|------------|
| 1 | HCS | 5 | > 7 0.5 | < 500 0.5 | | | | > 0.7 0.5 | | | | * | * | |
| 2 | SLOW | 3 | > 3 0.5 | < 450 2.0 | | | | < 1 0.5 | | | | | | |
| 3 | FAST | 3 | < 20 0.5 | ³ 450 2.0 | | | | < 1 0.5 | | | | | | |
| 4 | CIR | 5 | > 3 0.5 | | > 5 0.5 | > 1 3.0 | >0.007 0.5 | > 1 0.5 | | | | | | |
| 5 | EJECTA | 4 | < 10 0.5 | | | < 0.5 4.0 | <0.01 1.0 | < 0.5 1.0 | | | | | | |
| 6 | MC | 5 | < 10 0.5 | | > 10 3.0 | < 0.5 3.0 | <0.01 1.0 | < 0.5 1.0 | | | | | | |
| 7 | RARE | 4 | \leq 1 2.5 | < 500 0.5 | | < 1 0.5 | <0.01 0.5 | | | | | | | |
| 8 | IS | 4 | | | | | | | >50 1.0 | >2 1.0 | >2 1.0 | | | **a 1.0 |
| 9 | ISA | 4 | | | | | | | <-50 1.0 | <-2 1.0 | <-2 1.0 | | | **б 1.0 |

Примечание:

1. HCS и IS(ISA) – границы, а не протяженные области, поэтому для HCS - * надо проверять изменение знака B_x и B_y компонент ММП относительно предыдущего значения, для IS**а - приращение значения температуры $\Delta T > 0$, для ISA **б - приращение температуры $\Delta T < 0$
2. Для SHEATH использовались такие же критерии, как и для CIR

Таблица 2. Статистика визуально отобранных событий (число интервалов) за весь период времени 1976 – 2000 г.

| Тип событий | Суммарное число | Миним.число событий в году | Максим. число | Среднее число | Станд. отклонен. |
|-------------|-----------------|----------------------------|---------------|---------------|------------------|
| HCS | 1449 | 17 | 219 | 57.96 | 46.12 |
| CIR | 884 | 21 | 55 | 35.4 | 9.04 |
| SHEATH | 740 | 10 | 51 | 29.6 | 13.9 |
| EJECTA | 1567 | 36 | 123 | 62.68 | 23.45 |
| MC | 136 | 0 | 15 | 5.44 | 4.19 |
| RARE | 18 | 0 | 8 | 0.72 | 1.8 |
| IS | 319 | 2 | 43 | 12.8 | 10.2 |
| ISA | 14 | 0 | 5 | 0.56 | 1.3 |

Таблица 3. Средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров в различных типах солнечного ветра за 1976-2000 годы

| | HCS | SLOW | FAST | CIR | EJECTA | MC | SHEATH | RARE |
|----------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| Длит., ч Число соб. | 4,67±6,05 1443 | | | 20,6±12,2 718 | 29,8±20,5 1127 | 28,2±13,4 101 | 15,7±10,1 642 | 20,1±14,3 9 |
| $N, \text{см}^{-3}$ | 12,1±6,6 6208 | 10,8±7,1 84299 | 6,6±5,1 44543 | 14,1±9,9 12647 | 7,8±5,3 27259 | 10,1±8,0 2225 | 14,3±10,6 8596 | 1,7±1,8 139 |
| $V, 10^2 \text{ км/с}$ | 3,8±0,6 6214 | 3,7±0,4 84805 | 5,4±0,8 44798 | 4,5±0,9 12666 | 4,1±0,9 27310 | 4,1±1,1 2233 | 4,5±1,1 8615 | 5,1±1,6 146 |
| $B, \text{нТ}$ | 3,9±2,2 6322 | 5,9±2,9 67719 | 6,4±3,5 36179 | 8,7± 4,1 10493 | 6,4±2,8 23857 | 12,±5,2 2237 | 8,5±4,5 7286 | 6,7±2,2 116 |
| T/T_{exp} | 0,8±0,9 5950 | 1,0±1,4 75901 | 1,0±0,7 40026 | 1,7±2,0 11149 | 0,7±1,3 25275 | 0,7±1,5 2016 | 1,5±1,2 7851 | 1,1±0,9 124 |
| $T, 10^4 \text{ К}$ | 4,1±4,1 5950 | 4,4±4,4 75901 | 13,1±11,8 40026 | 13,8±13,3 11149 | 4,2±5,3 25275 | 4,5±6,6 2016 | 12,9±17,6 7851 | 11,1±10,7 124 |
| $NkT, 10^{-2}$ нПа | 0,6±1,3 5950 | 0,6±1,3 75901 | 1,3±2,3 40026 | 2,2±2,8 11149 | 0,4±1,2 25275 | 0,7±2,0 2016 | 2,2±3,6 7851 | 0,3±0,5 124 |
| $\beta, 10^{-1}$ | 9,5±0,2 5878 | 5,2±0,0 59669 | 6,1±0,1 32244 | 6,5±0,1 8829 | 3,1±0,0 20518 | 1,6±0,1 1725 | 6,5±0,1 6465 | 2,3±0,5 100 |
| $B_z, \text{нТ}$ | -0,01±2,3 6322 | 0,08±3,1 67719 | 0,05±3,4 36179 | 0,2±4,4 10493 | 0,03±3,3 23857 | -0,8±7,7 2237 | 0,10±4,9 7286 | 0,80±2,8 116 |
| $D_{\text{st}}, \text{нТ}$ | -6,5±15,0 6415 | -10,7±18,2 85459 | -28,7±25,9 45017 | -18,0± 27,2 13120 | -21,1± 25,4 29046 | -52,1± 45,8 2571 | -21,5± 33, 68856 | -27,0± 22,0 147 |
| $mNV^2, \text{нПа}$ | 2,9±1,4 6208 | 2,4±1,6 84299 | 3,2±2,8 44543 | 4,4±2,8 12647 | 2,1±1,7 27259 | 3,3±3,2 2225 | 4,9±4,7 8596 | 0,8±0,6 139 |