САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи
УДК 523.62-726

Усманов Аркадий Владимирович

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Специальность 01.03.03 — Гелиофизика и физика солнечной системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
доктор физ.-мат. наук, проф.
М. И. Пудовкин

Санкт-Петербург
1999

Работа выполнена в Санкт-Петербургском Государственном Университете.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Н. В. Еркаев
доктор физико-математических наук, А. И. Подгорный
доктор физико-математических наук, О. А. Трошичев

Ведущая организация: Институт Космических Исследований (г. Москва).

Защита состоится “ ” 1999 г. в часов на заседании специализированного совета Д.063.57.51 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199164, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. А. М. Горького СПбГУ.

Автореферат разослан “ ” 1999 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук С. А. Зайцева

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию структуры и динамики солнечного ветра. В работе построены дву- и трехмерные теоретические модели, описывающие течение солнечного ветра в области от основания солнечной короны ($r = 1\ R_\odot$, где $R_\odot$ — радиус Солнца) до расстояний 1–10 астрономических единиц (или а. е., 1 а. е. = 215 $R_\odot$).

Актуальность проблемы определяется как теоретическим, так и практическим аспектами. Целью исследований в области солнечно-земной физики является выявление связей процессов на Солнце с последующими событиями в магнитосфере Земли. Эмпирические интерпретационные построения, основанные на сопоставлении событий, как правило неоднозначны (например, сопоставление наблюдений вспышек на Солнце с вариациями параметров солнечного ветра на орбите Земли вызывает серьезные затруднения из-за неопределенностей в идентификации связи событий). Поэтому трудно переоценить важность разработки физических моделей солнечного ветра, позволяющих рассчитывать глобальную структуру и распространение возмущений (ударных волн, корональных выбросов массы) к различным точкам наблюдения в гелиосфере.

Геометрия течения в солнечной короне и солнечном ветре формируется в результате взаимодействия потока расширяющейся корональной плазмы и магнитного поля. В области дозвукового и доальвеновского течения вблизи Солнца магнитные силы доминируют над градиентом плазменного давления и гравитационной силой, и распределение магнитных полей в нижней короне определяет крупномасштабную структуру солнечного ветра. Интенсивность магнитного поля убывает с удалением от Солнца $\sim r^{-3}$, и на расстояниях $\gtrsim$ 10–20 $R_\odot$, где течение становится сверхальвеновским, магнитное поле оказывает сравнительно малое влияние на течение плазмы. Корональное и межпланетное магнитное поле (ММП) являются фотосферным полем, вытянутым в межпланетное пространство расширяющейся корональной плазмой,

и, следовательно, данные наблюдений фотосферных магнитных полей могут быть использованы для определения структуры солнечной короны. Доступность этих данных в совокупности с наличием развитых методов численного решения нелинейных дифференциальных уравнений приводит к идее о том, что течение солнечного ветра и структура магнитного поля в межпланетном пространстве могут быть рассчитаны с помощью численного решения уравнений магнитной гидродинамики (МГД) с использованием данных наблюдений магнитных полей на солнечной фотосфере в качестве граничных условий. Заметим, что структура течения в солнечной короне может быть рассчитана и при упрощающем предположении о течении в заданной (в потенциальном приближении) геометрии магнитного поля или в кинематическом приближении. Однако, самосогласованная трактовка явно более предпочтительна ввиду упомянутого попеременного доминирования магнитного и динамического давления в динамике солнечного ветра.

Первый подход, который широко использовался в течение последних двух десятилетий при моделировании динамики межпланетной плазмы и магнитного поля в стационарном и нестационарном, одно-, дву- и трехмерном случаях, состоит в решении уравнений гидродинамики или магнитной гидродинамики в области сверхзвукового и сверхальвеновского течения. При этом положение внутренней границы выбирается так, что все критические точки течения (переходы через скорость звука, альвеновскую скорость, магнитозвуковые скорости) располагаются вне расчетной области. В этом случае на внутренней границе могут быть заданы произвольные граничные и/или начальные условия. Как правило, эти условия задаются на сфере (или на окружности в двумерном случае) радиусом 0,08–0,16 а. е.. Затем начальная задача Коши решается с использованием явной численной схемы с помощью интегрирования уравнений вдоль гиперболической радиальной координаты в стационарном или вдоль гиперболической временно́й координаты в нестационарном случае.

Основным вопросом в случае данного подхода является вопрос о граничных условиях, которые должны быть заданы на исходном уровне. Наиболее естественным ответом на этот вопрос является задание этих условий из решения проблемы определения структуры трансзвукового/трансальвеновского течения вблизи Солнца. Решение этой проблемы является вторым подходом к моделированию динамики межпланетной среды. Работы в этом направлении были инициированы пионерским исследованием Пноймана и Коппа (1971), которые впервые получили самосогласованное стационарное решение для случая двумерной (осесимметричной) конфигурации с магнитным полем дипольного типа, воспроизводящей корональный стример. Пнойман и Копп ограничились рассмотрением изотермического случая и использовали итерационную процедуру для построения решения, описывающего результирующее стационарное состояние.

Иной подход к решению задачи Пноймана-Коппа сформулировал Эндлер (1971). Эндлер предложил рассматривать проблему как смешанную начально-краевую задачу для нестационарной системы МГД уравнений и использовать релаксационный подход (метод установления), посредством которого стационарное решение ищется как результат временно́й эволюции некоторого начального распределения плазмы и магнитного поля при заданных граничных условиях. Благодаря тому, что система нестационарных уравнений имеет гиперболический тип по отношению к временно́й координате, данный подход позволяет использовать те же явные методы, что и применяемые для расчетов сверхзвуковых и сверхальвеновских течений.

В настоящей диссертации мы предпринимаем попытку построить полные решения МГД уравнений в дву- и трехмерном, стационарном и нестационарном случаях в приложении к структуре солнечного ветра и ММП в области от основания короны $r = 1\ R_\odot$ *до нескольких астрономических единиц. Насколько нам известно, данное исследование является первой попыткой объединить оба указан-*

ных выше подхода к моделированию структуры межпланетной среды. Кроме того, мы проводим прямое сопоставление модельных профилей параметров межпланетной среды с данными измерений на космических аппаратах.

Следующий вопрос: какие граничные условия следует задавать вблизи поверхности Солнца? Совершенно очевидно, что при этом нужно использовать наблюдения крупномасштабных магнитных полей солнечной фотосферы, выполненные в обсерватории Стэнфордского университета и в Саянской обсерватории Института солнечно-земной физики. Следующее обстоятельство до некоторой степени упрощает задание граничных условий для других переменных. Дело в том, что в случае нахождения исходной граничной поверхности в области сверхзвукового и сверхальвеновского течения граничные значения должны быть заданы для *всех* зависимых переменных (без нарушения, конечно, условия соленоидальности магнитного поля). Выбор же основания короны, где течение является дозвуковым и доальвеновским, в качестве такой границы имеет то преимущество, что часть граничных значений могут быть рассчитаны по параметрам течения вблизи границы с использованием уравнений вдоль приходящих на границу характеристик. В качестве альтернативы уравнениям вдоль характеристик может быть использована процедура экстраполяции.

В настоящей диссертации мы описываем расчеты структуры солнечного ветра, в которых при задании граничных условий используются данные наблюдений фотосферных магнитных полей. Это свойство является уникальной особенностью описываемых моделей[1].

Исследования, упомянутые выше, были весьма успешны в выявлении особенностей распределения магнитного поля и плазмы во внутренней короне Солнца. В частности, распределения поляризационной яркости, полученные из МГД расчетов, достаточно хорошо согласу-

[1] Измерения фотосферного магнитного поля недавно нашли применение при задании граничных условий также в работах Линкера и Микича.

ются с данными, полученными во время солнечных затмений. МГД модели также правильно описывают тенденцию к возрастанию скорости течения при изменении конфигурации магнитного поля от закрытого к открытому типу. Хотя основные особенности решений, полученных из идеальных МГД уравнений, достаточно хорошо согласуются с наблюдениями магнитных полей в солнечном ветре, без включения дополнительного протяженного источника момента и энергии эти решения не в состоянии, по-видимому, прийти в согласие с наблюдениями высокоскоростного солнечного ветра. В настоящее время, наиболее вероятным кандидатом на роль этого дополнительного источника является поток альвеновских волн, распространяющихся от Солнца. Предполагается, что альвеновские волны, наблюдаемые в солнечном ветре, являются остатком волнового потока, генерируемого в конвективной зоне Солнца и нагревающего солнечную хромосферу и нижнюю корону.

Роль альвеновских волн в энергетике и динамике коронального расширения обсуждается со времени их открытия при анализе спутниковых наблюдений в солнечном ветре. Дальнейшие исследования показали, что альвеновские волны могут создавать дополнительное давление, которое может давать существенный вклад в ускорение солнечного ветра. В настоящее время существует целый ряд моделей солнечного ветра, которые учитывают эффекты альвеновских волн в уравнениях движения и энергии. Однако, все эти модели являются одномерными и не описывают нерадиальные вариации в параметрах магнитного поля и плазмы.

В настоящей диссертации мы описываем дву- и трехмерные модели солнечной короны и солнечного ветра с дополнительным энергетическим источником в виде альвеновских волн, обеспечивающим усиленный нагрев и ускорение солнечного ветра в областях с открытой конфигурацией магнитного поля. Это свойство также является уникальной особенностью описываемых моделей.

поля B_r, возрастающую от экватора к полюсам. Ulysses, однако, не обнаружил заметного широтного градиента в B_r. Это обстоятельство указывает на существование переноса магнитного потока к низким широтам и концентрации гелиосферных токов в относительно тонком ГТС.

Классические модели потенциального и бессилового поля, в которых задается радиальная конфигурация магнитного поля вне поверхности источника, не могут быть, по-видимому, приведены в согласие с наблюдениями на Ulysses без включения дополнительных токов, ответственных за ГТС. В то же время, токовые слои, простирающиеся на большие гелиоцентрические расстояния являются неотъемлемым свойством моделей, основанных на самосогласованном описании взаимодействия течения и магнитного поля.

Достоинством МГД подхода является также возможность самосогласованного расчета геометрии магнитного поля и, в частности, расширения магнитных силовых трубок. В моделях солнечного ветра, которые не учитывают в согласованной форме взаимодействие между плазмой и магнитным полем, фактор расширения f_s (отношение телесных углов, занимаемых сечениями силовой трубкой на определенном расстоянии от Солнца и в основании короны) рассматривается либо как свободный параметр (все одномерные модели обладают этим свойством), либо рассчитывается в потенциальном или бессиловом приближении. В стационарном случае геометрия силовых трубок магнитного поля совпадает с геометрией течения (в системе координат, вращающейся с Солнцем) и, следовательно, является очень важным параметром для моделей солнечного ветра.

Самосогласованный расчет расширения магнитных силовых трубок, требующий рассмотрения баланса давлений между соседними силовыми трубками, является естественной составной частью дву- и трехмерных моделей. Поперечный баланс давлений играет важную роль в определении геометрии силовых трубок и должен быть включен в расчеты гелиосферной структуры, так как данные Ulysses говорят о

существенно нерадиальном расширении солнечной короны.

В настоящей диссертации мы выполняем прямое сопоставление результатов модельных расчетов с данными Ulysses и показываем, что они согласуются между собой. При этом рассчитанные параметры в основании короны соответствуют характерным значениям, выведенным из наблюдений.

Цель работы. Итак, целью диссертации являлась разработка физических моделей солнечного ветра и применение этих моделей для исследования структуры и динамики межпланетных магнитных полей и плазмы. В задачу работы входило решение следующих взаимосвязанных задач:

1. Построение дву- и трехмерных самосогласованных решений МГД уравнений в приложении к структуре солнечного ветра и ММП в области от основания солнечной короны $r = 1\ R_\odot$ до расстояний в нескольких астрономических единиц.

2. Использование данных наблюдений фотосферных магнитных полей при задании граничных условий на внутренней границе расчетной области.

3. Включение в дву- и трехмерные расчеты дополнительного энергетического источника в виде альвеновских волн, обеспечивающих усиленный нагрев и ускорение солнечного ветра в областях с открытой конфигурацией магнитного поля.

4. Прямое сопоставление профилей параметров межпланетной среды, полученных из дву- и трехмерных расчетов, с данными измерений на космических аппаратах в интервале гелиоцентрических расстояний 0,5–8 а. е.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Главным результатом работы является создание глобальной трехмерной модели солнечного ветра. Основа модели — численное самосогласованное решение магнитогидродинамических уравнений, описывающих течение солнечного ветра в политропном приближении.

Расчетная область простирается от основания короны до нескольких астрономических единиц. Наблюдения фотосферного магнитного поля используются при задании граничных условий на внутренней границе расчетной области.

2. Разработан метод построения стационарного решения трехмерных МГД уравнений, заключающийся в разделении расчетной области на внутреннюю область I, где стационарное решение строится релаксационным методом, и внешнюю область II, где решение строится с помощью интегрирования стационарных уравнений вдоль радиальной координаты. Граница между этими областями выбирается так, чтобы все особые точки стационарной системы уравнений располагались в области I. Для инициализации интегрирования во внешней области используется решение, полученное в области I на границе с областью II.

3. Построены решения трехмерных стационарных МГД уравнений в области между фотосферой Солнца и 10 а. е. Результаты расчетов сравниваются с данными наблюдений корональных дыр и спутниковыми измерениями на орбите Земли. Сравнение показывает качественное согласие рассчитанных и измеренных параметров.

4. На основе трехмерной нестационарной модели исследована динамика солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в июне 1991 г. в области от 1 $R_\odot$ до ~1,5 а. е. Расчеты включают транзиентные возмущения, распространяющиеся через неоднородный фоновый солнечный ветер, от восьми интенсивных солнечных вспышек июня 1991 г. Фоновый ветер рассчитывается на основе трехмерной стационарной модели. Параметры солнечного ветра и ММП, рассчитанные для гелиоцентрического положения Земли в течение 1–18 июня 1991 г., находятся в качественном согласии с доступными данными спутниковых наблюдений и вариацией K_p индекса геомагнитной активности.

5. Построены стационарные решения МГД уравнений в дву- и трехмерном случае с учетом альвеновских волн в ВКБ приближении. Показано, что учет эффектов альвеновских волн позволяет количе-

ственно воспроизвести распределение параметров в высокоскоростных потоках солнечного ветра.

6. На основе трехмерной стационарной модели с альвеновскими волнами выполнены расчеты структуры солнечного в период максимума 21 цикла солнечной активности. Результаты расчетов сопоставлены с данными наблюдений на космических аппаратах в интервале гелиоцентрических расстояний от 0,5 до 7 а. е. Показано, что в общем имеется согласие рассчитанных и наблюденных профилей.

7. Построены двумерные решения с учетом альвеновских волн, описывающие стационарные течения плазмы в магнитной конфигурации дипольного типа. Показано, что меридиональная структура солнечного ветра определяется двумя динамическими процессами. Первый из них — это меридиональная релаксация и формирование плоских меридиональных профилей параметров течения и магнитного поля (вне экваториального пояса) в области, где магнитные силы доминируют над градиентами теплового и волнового давления; это формирование завершается на расстоянии, где плазменный параметр, рассчитанный по сумме теплового и волнового давлений, $\beta_T \approx 1$. Второй процесс — меридиональное перераспределение в результате действия направленного к полюсу градиента теплового давления, который возникает в результате первичного процесса. Следствиями вторичного процесса являются небольшой меридиональный градиент, который развивается в удаленном высокоскоростном ветре: направленный к полюсу градиент радиальной скорости течения и направленный к экватору градиент радиальной компоненты магнитного поля.

Научная новизна. Модели солнечного ветра, представленные в настоящей работе, не имеют аналогов. Решения перечисленных выше задач получены впервые в работах автора.

Совокупность результатов, представленных в диссертации, является обобщением и развитием теории солнечного ветра. Показана пригодность разработанных моделей для расчета параметров сол-

нечного ветра и межпланетного магнитного поля в заданной точке гелиосферы по наблюдениям магнитных полей на Солнце, т. е. для прогноза "космической погоды". Теоретические положения и модели, развитые в диссертации, представляют собой инструмент для интерпретации большой совокупности экспериментальных данных, полученных как наземными средствами, так и на космических аппаратах. Основные результаты работы были использованы при составлении курса лекций по физике геомагнитных явлений, читаемого студентам 5 курса СПбГУ.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на первом (Либлица, 1991 г.), втором (Накаминато, 1994 г.) и третьем (Пекин, 1996 г.) SOLTIP симпозиумах, на XVII EGS General Assembly (Эдинбург, 1992 г.), 1992 STEP Symposium/5th COSPAR Colloquium (Вашингтон, 1992 г.), Solar Wind-Magnetosphere Interaction Workshops (Грац, 1992 и 1995 гг.), Совещании "Математические модели ближнего космоса" (Москва, 1993 г.), Assembly of the Austrian Physical Society (Грац, 1993 г.), 28th ESLAB Symposium "The High Latitude Heliosphere" (Фридрихсхафен, 1994 г.), International Symposium on Solar Terrestrial Physics (Сендай, 1994 г.), 30th COSPAR Scientific Assembly (Гамбург, 1994 г.), Solar Wind 8 Conference, (Дана Поинт, 1995 г.), XXII General Assembly of European Geophysical Society (Вена, 1997 г.), Geospace II Conference (С-Петербург, 1998 г.), 32nd COSPAR Scientific Assembly (Нагоя, 1998 г.), Solar Wind 9 Conference (Нантукет, 1998 г.), The 22nd General Assembly of the IUGG (Бирмингем, 1999 г.), The CRDF symposium (Вашингтон, 1999 г.), семинарах в НИИФ СПбГУ, Институте космических исследований Австрийской академии наук (Грац), Финском метеорологическом институте (Хельсинки), Центре космических полетов им. Годдарда (Гринбелт).

Основные результаты диссертации опубликованы в 23 работах.

Взаимоотношения с соавторами. Научные результаты и выводы, изложенные в диссертации, получены непосредственно автором. В работах, выполненных совместно с М. И. Пудовкиным, М. Драйером,

М. Л. Голдстейном, Б. П. Бессером и др., соавторы внесли равные вклады.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, 87 рисунков, 7 таблиц и списка литературы из 441 наименований. Общий объем — 359 страниц.

Содержание работы

Структура работы определяется последовательным усложнением согласованной модели солнечной короны и солнечного ветра от стационарной двумерной модели до трехмерных нестационарных расчетов распространения возмущений. Создание модели включает также тестирование результатов численных расчетов на экспериментальном материале и их сопоставление с уже известными теоретическими представлениями.

Во введении обоснована актуальность темы, обсуждены задачи и особенности работы, приведены основные защищаемые положения.

В главе 1 представлены характеристики многочисленных моделей солнечного ветра, предложенных к настоящему времени. Модели классифицированы в зависимости от размерности решаемой проблемы (одно-, дву- и трехмерные задачи) и стационарности или нестационарности полученных решений. Мы не ставили перед собой задачи составить исчерпывающую библиографию по проблеме моделирования солнечного ветра, но постарались включить в обзор работы, в которых построены количественные модели солнечного ветра на основе решений уравнений гидродинамики или магнитогидродинамики, начиная с классической работы Паркера.

В рамках настоящей диссертации моделирование структуры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля основано на решении одножидкостных бездиссипативных уравнений магнитной гидродинамики. Система уравнений включает законы сохранения массы, импульса, магнитной индукции и энергии. Зависимыми переменными

являются скорость, магнитное поле, плотность и давление. Система уравнений относится к гиперболическому типу по отношению к временно́й координате в нестационарном случае и по отношению к радиальной координате в случае стационарного течения со скоростью, превышающей все характеристические скорости распространения возмущений в данной среде. В главе 2 описаны различные формы представления МГД уравнений, используемых для описания солнечного ветра. Приведены консервативная и неконсервативные формы МГД уравнений в сферических координатах, в стационарном и нестационарном случаях, а также с учетом солнечного вращения. Выписаны уравнения с учетом эффектов альвеновских волн в ВКБ приближении.

В главе 3 построены самосогласованные решения двумерных МГД уравнений в экваториальной плоскости гелиографической системы координат. Граничные условия для магнитного поля задаются из наблюдений крупномасштабного магнитного поля Солнца. Расчетная область делится на две части: область I — область трансзвукового потока — простирается от основания короны ($r = 1\ R_\odot$) до $r = 10\ R_\odot$, область II — область сверхзвукового и сверхальвеновского течения — от $r = 10\ R_\odot$ до орбиты Земли ($r = 215\ R_\odot$). Решение в области I строится релаксационным методом, а в области II — интегрированием вдоль радиальной координаты. Условия на внутренней границе области II ($r = 10\ R_\odot$) задаются из решения задачи в области I. В области II учитывается солнечное вращение и, следовательно, взаимодействие высоко- и низкоскоростных потоков.

В качестве теста для предлагаемой численной методики воспроизводится решение проблемы, полученное в работе Стейнольфсона и др. (1982). Для апробации модели на экспериментальных данных используются наблюдения солнечного магнитного поля, выполненные в Стэнфордском университете в течение кэррингтоновского оборота 1682 (23 мая – 19 июня 1979 г.). Эти данные используются при задании граничных условий в основании короны. Стационарное решение, соответ-

ствующее заданным граничным условиям, строится для области I и затем пересчитывается к орбите Земли через область II. Рассчитанные скорость, плотность и температура солнечного ветра, а также радиальная компонента магнитного поля сравниваются с наблюдениями на космических аппаратах. Показано, что рассчитанные вариации параметров плазмы и магнитного поля качественно воспроизводят наблюденные, хотя различие в амплитудах вариаций плазменных параметров очень велико.

В главе 3 показано также, что для обратного проецирования характеристик солнечного ветра от орбиты Земли к Солнцу до расстояний $r \sim 35\ R_{\odot}$ могут использоваться численные МГД-модели, и что применение численных МГД-моделей позволяет уточнить приближение постоянной скорости для обратного проецирования скоростных структур солнечного ветра и получить информацию о распределении параметров межпланетной плазмы (плотности, давления, температуры, магнитного поля) на значительно более близких расстояниях от Солнца, чем орбита Земли.

Обобщение решений, полученных в главе 3, на трехмерный случай выполнено в главе 4. В этой главе описана трехмерная модель стационарного солнечного ветра. Самосогласованные решения трехмерных МГД уравнений построены в области между фотосферой Солнца и 10 а. е. Граничные условия задаются из наблюдений солнечных магнитных полей. В области трансзвукового течения вблизи Солнца стационарное решение строится релаксационным методом, в сверхзвуковой области — с помощью интегрирования вдоль радиальной координаты. Сравнение результатов расчетов для кэррингтоновского оборота 1682 (23 мая – 19 июня 1979 г.) с данными спутниковых наблюдений на орбите Земли показывает их качественное согласие. Несмотря на все еще существенное различие в плотностях, трехмерная модель лучше воспроизводит вариации скорости солнечного ветра, чем представленная в главе 3 двумерная модель. Выполнен расчет глобальной структуры

солнечного ветра для кэррингтоновского оборота 1843 (31 мая - 28 июня 1991 г.) и построено самосогласованное решение трехмерных уравнений для сферической оболочки от солнечной фотосферы до 10 а. е.. Вычисленное распределение магнитного поля сравнивается с наблюдениями корональных дыр и измерениями на околоземном космическом аппарате IMP-8.

Ортографическая проекция, иллюстрирующая топологию магнитного поля во внутренней короне, представлена на рис. 1. Приведенная на этом рисунке конфигурация магнитного поля является конечным результатом релаксационного процесса, в котором течение плазма взаимодействует с магнитным полем до достижения стационарного состояния. Силовые линии трассируются от уровня фотосферы до $r = 1,8\ R_{\odot}$, выбранном в качестве верхней границы при прослеживании силовых линий. Силовые линии прослеживаются на сетке с шагом 10°, покрывающей солнечную полусферу, видимую с Земли 16 июня 1991 г в 2:43 UT (видимый центр солнечного диска имеет гелиодолготу $\phi = 160^{\circ}$ и гелиошироту $B_0 = 1,1^{\circ}$).

Конфигурация магнитного поля, представленная на рис. 1, состоит из открытых структур, окруженных поясами замкнутых структур, которые отслеживают нейтральную линию крупномасштабного магнитного поля. Особенностью рис. 1 является большая область отрицательной полярности (с магнитным полем, направленным к Солнца), которая видна к востоку (т. е. слева) от центрального меридиана. Эта униполярная область смещена к югу относительно экватора и имеет максимальную величину поля -4,9 Г вблизи своего центра. Заштрихованным контуром на рис. 1 показано также наблюденное положение корональной дыры. Как можно видеть, положение корональной дыры, выведенное из фотографий Солнца в линии He λ10830 Å, в целом совпадает с открытой областью сильного радиального поля.

Распределение параметров течения, соответствующее магнитной конфигурации рис. 1, показано на рис. 2 двумя картами изолиний,

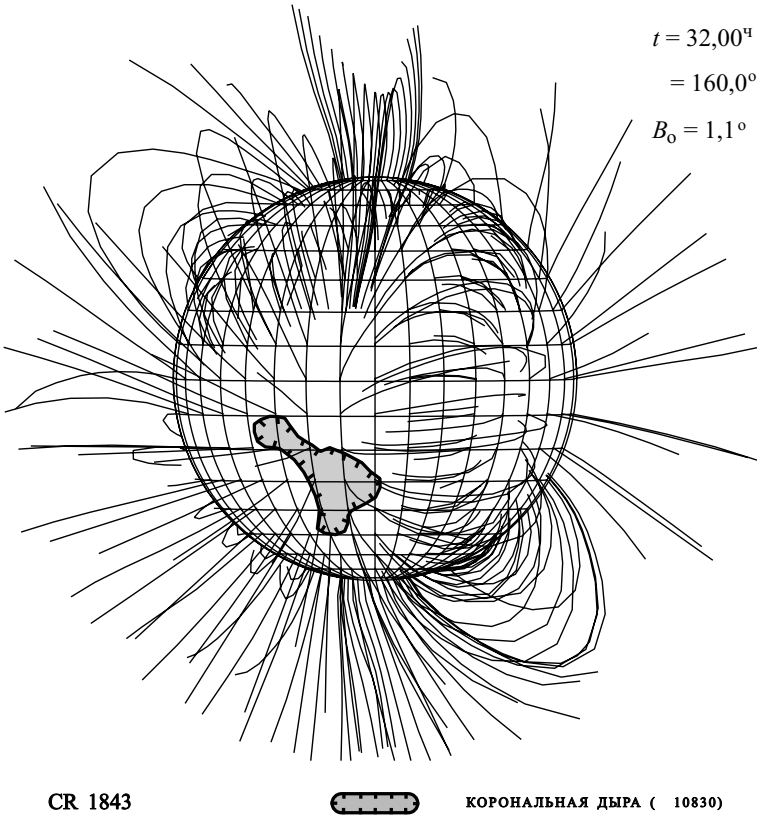

Рис. 1: Результаты расчетов в области I для кэррингтоновского оборота 1843: топология магнитного поля во внутренней короне в результирующем стационарном состоянии. Точка наблюдения расположена в экваториальной плоскости на 160° гелиодолготы и соответствует положению Земли 16 июня 1991 в 02:43 UT. Поверхность Солнца покрыта сеткой гелиографических координат с шагом 10°; восток — слева. t — время релаксации, B_0 — гелиоширота проекции Земли. Положение корональной дыры, определенное из фотографий Солнца в линии He 10830, показано заштрихованным контуром.

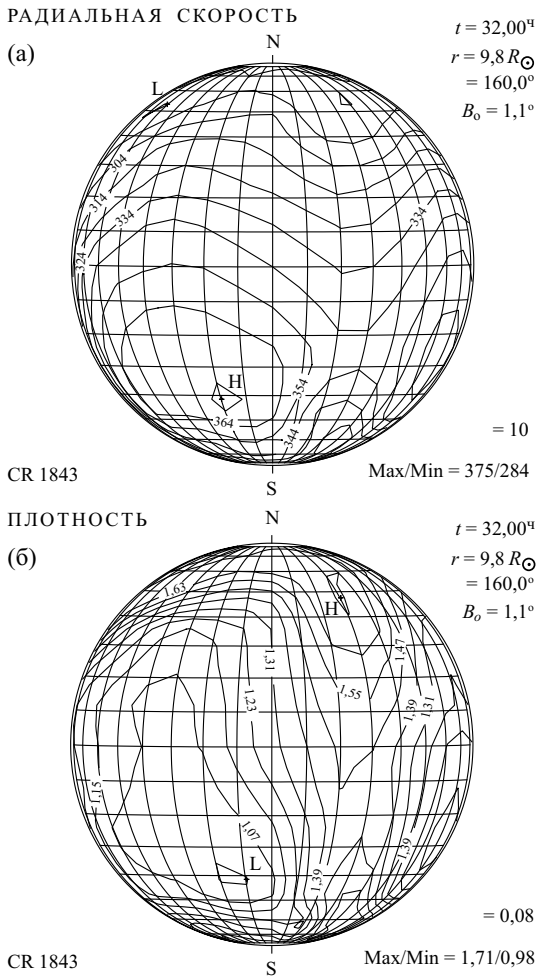

Рис. 2: Результаты расчетов для области I: изолинии постоянной радиальной скорости (в км $с^{-1}$) (а) и плотности, нормированной к соответствующим значениям в начальном состоянии, (б) на внешней границе (9,85 $R_\odot$) в проекции на сферу с той же точки наблюдения, что и на рис. 1.

иллюстрирующими структуру течения на внешней границе области I ($r = 9,85\ R_\odot$). Верхний график представляет контуры изолиний постоянной радиальной скорости, а нижний — контуры плотности плазмы. Обе графика даны в той же проекции, что и на рис. 1. Рис. 2 показывает, что над униполярной областью, содержащей корональную дыру, развивается область повышенной скорости течения. Вариации плотности плазмы, показанные на рис. 2, противоположны по знаку вариациям радиальной скорости. Плотность является пониженной в области над корональной дырой и имеет минимум вблизи максимума радиальной скорости. Таким образом, результаты наших расчетов поддерживают концепцию корональных дыр как источника стационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра.

Многочисленные исследования, посвященные изучению динамики распространения возмущений, связанных со вспышками или корональными транзиентами, основываются на решении нестационарных гидродинамических или магнитогидродинамических уравнений. Публикуемые модели становились все совершеннее, усложняясь от простых одно- и двумерных гидродинамических расчетов до одно- и двумерных МГД моделей и даже до полностью трехмерных МГД моделей, в которых все пространственные компоненты и производные принимаются в рассмотрение На основе перечисленных выше моделей, были выполнены расчеты распространения транзиентных возмущений, скоординированные с наблюдениями вспышек, корональных транзиентов и солнечного ветра.

Все модели и расчеты конкретных событий, упомянутые выше, имеют два существенных недостатка. Во-первых, ни одна из этих моделей (за исключением одномерных моделей) не покрывает весь диапазон гелиоцентрических расстояний между поверхностью Солнца, где зарождаются возмущения ($r = 1\ R_\odot$), и орбитой Земли, где проводится большая часть наблюдений солнечного ветра. Первый класс моделей рассматривает распространение транзиентов в сверхзвуковом и

сверхальвеновском течении благодаря выбору внутренней границы расчетной области на расстоянии 0,08 а. е. Хотя такой подход упрощает задание граничных условий и позволяет рассматривать произвольные начальные импульсы, результаты моделирования этого типа всецело зависят от неоднозначного и многопараметрического задания импульса на входной границе. Более того, как показано в работах, различная динамика и структура межпланетных возмущений может являться результатом схожих начальных импульсов, если они локализованы в дозвуковой/доальвеновской или сверхзвуковой/сверхальвеновской областях. Второй класс моделей рассматривает транзиенты в околосолнечной области, ограниченной извне сферой радиусом 2–26 $R_{\odot}$. Очевидно, что для моделей этого типа представляется крайне желательным включение в рассмотрение более удаленных областей межпланетного пространства.

Вторым недостатком перечисленных выше моделей является то, что они не используют наблюдения магнитных полей на Солнце для расчетов структуры фонового (стационарного) солнечного ветра. Начальное состояние, которое должно быть определено до инициализации моделируемого транзиентного события, обычно задается как: (1) сферически-симметричное (все одномерные модели имеют, естественно, этот тип начального распределения параметров) или осесимметричное стационарное течение, (2) решение задачи стационарного течения, полученное для простых модельных зависимостей магнитного поля и скорости от долготы или широты, заданных на исходном уровне, расположенном в области сверхзвукового и сверхальвеновского течения, (3) изотермическая атмосфера в гидростатическом равновесии, пронизанная потенциальным магнитным полем, и (4) равновесная конфигурация коронального стримера, рассчитанная релаксационным методом. Среди перечисленных подходов наиболее прогрессивным является, несомненно, последний, в котором самосогласованное решение для коронального стримера используется в качестве начального состояния. В

то время как случай (1) — сферически- или осесимметричного течения — является слишком упрощенным, (2) подходит для исследования области сверхзвукового сверхальвеновского течения (где влияние магнитного поля сравнительно мало), а (3) оправдан лишь в области вблизи Солнца (где магнитное поле доминирует), (4) справедливо на любых гелиоцентрических расстояниях вследствие самосогласованного описания взаимодействия течения и магнитного поля. Кроме того, (4) наилучшим образом подходит для включения в модельные расчеты наблюдений магнитного поля вместо простых модельных функций для задания граничных условий.

Для исследования динамики межпланетной среды в глобальном масштабе, начальное состояние, описывающее фоновый солнечный ветер, должны быть задано в области, простирающейся от поверхности Солнца до, по крайней мере, 1 а. е.. В качестве этого начального состояния мы используем результаты расчетов по стационарной модели, описанные в главе 3. Эта модель включает две области: внешнюю область сверхзвукового и сверхальвеновского течения, где решаются стационарные МГД уравнения, и внутреннюю область трансзвукового и трансальвеновского течения, где решение строится релаксационным методом. Поскольку как при нахождении стационарного состояния посредством релаксации, так и при моделировании нестационарных процессов, необходимо решать одни и те же уравнения, для исследования распространение транзиентных возмущений может быть использован один и тот же численный метод.

В главе 5 на основе трехмерной нестационарной МГД-модели исследуется глобальная динамика солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в июне 1991 г. Расчеты включают транзиентные возмущения, распространяющиеся через неоднородный фоновый солнечный ветер, от восьми очень интенсивных солнечных вспышек балла M4–X12, произошедших в июне 1991 г. Уникальные особенности представленных расчетов состоят том, что инициализация возмущений осу-

ществляется вблизи поверхности Солнца $r = 1\ R_\odot$ и прослеживание их трехмерной эволюции производится до расстояний ~1,5 а. е. и, что в качестве фона для распространения транзиентов используется глобальная стационарная структура солнечного ветра, рассчитанная на основе данных наблюдений солнечных магнитных полей (глава 4). Параметры возмущений, имитирующих солнечные вспышки, задаются на основе данных по скоростям ударных волн вблизи Солнца с использованием параметров невозмущенного течения вблизи наблюденных местоположений вспышек при помощи соотношений Рэнкина-Гюгонио. Скорости ударных волн определяются на основе данных по радиовсплескам II типа. Рассчитанные параметры солнечного ветра вдоль положения Земли в течение 1–18 июня 1991 г. сопоставлены с имеющимися данными наблюдений межпланетного магнитного поля, скорости солнечного ветра, плотности и вариацией K_p индекса геомагнитной активности.

Глава 6 посвящена двумерным расчетам стационарного течения плазмы в магнитной конфигурации дипольного типа, характерной для наблюдений на Ulysses в течение 1994–1995 гг., и сопоставлению результатов расчетов с измерениями на Ulysses. В отличие от главы 3 расчеты проводятся с учетом дополнительного источника нагрева и ускорения солнечного ветра в виде распространяющегося от Солнца потока альвеновских волн, описываемых ВКБ приближением. Решения, полученные с учетом и без учета альвеновских волн, сравниваются между собой и делается вывод о том, что учет эффектов альвеновских волн позволяет количественно воспроизвести распределение параметров в высокоскоростных потоках солнечного ветра. В главе 6 рассматриваются две модели. Первая из них представляет собой самосогласованное решение, описывающее течение в магнитном поле дипольного типа и построенное для экваториальной плоскости сферической системы координат. Второй моделью являются двумерные осесимметричные решения с магнитным диполем, ориентированным вдоль полярной оси.

Карты изолиний радиальной и меридиональной скорости пока-

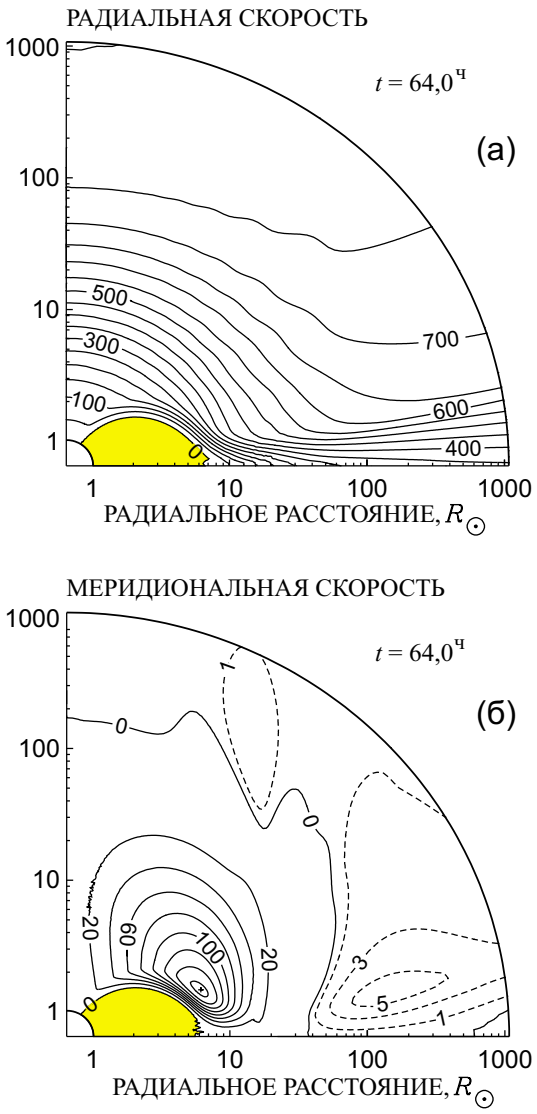

Рис. 3: Изолинии радиальной (а) и меридиональной (б) скорости.

заны на рис. 3. Вблизи экватора формируется застойная область (ограниченная нулевой изолинией и заштрихованная), в которой скорость течения близка к нулю. Это область простирается от входной границы при $r = 1\ R_\odot$, где она занимает диапазон широт $\theta \leq 30°$, до $r \sim 7\ R_\odot$и совпадает с областью замкнутого поля. За исключением сектора широт над застойной областью, течение слабо зависит от широты и ускоряется до скоростей $\geq$700 км с$^{-1}$ вдоль большей части выходной границы при $r = 5$ а. е. Корональная плазма обтекает застойную область с наибольшей поперечной скоростью $u_\theta = 166$ км с$^{-1}$ (рис. 3б). Следовательно, течение вблизи Солнца сильно нерадиально, причем источником как быстрого, так и медленного ветра является область на Солнце $\theta \lesssim 30°$. Таким образом, корональные дыры (области короны с открытой геометрией магнитного поля и потоком плазмы наружу) занимают полярные области вплоть до $\theta \sim 30°$ и покрывают только незначительную часть ($\sim$13%) поверхности Солнца. Этот результат находится в согласии с наблюдениями корональных дыр во время пролета Ulysses.

На рис. 4 представлены среднесуточные значения радиальной компоненты магнитного поля, плотности и температуры плазмы по наблюдениям на Ulysses в зависимости от широты за период с 13 сентября 1994 г. по 31 июля 1995 г. При этом мы нормировали интенсивность радиальной компоненты и плотности плазмы к 1 а. е., предполагая, что оба параметра изменяются с расстоянием $\sim r^{-2}$. Плазменная температура была также нормирована к 1 а. е. в предположении, что она меняется с расстоянием $\sim r^{-2(\gamma-1)}$ с $\gamma = 1,46$, принятым для области II.

На каждый график с данными Ulysses на рис. 4 нанесены две модельные кривые. Штриховой линией показана вариация, рассчитанная по описанной выше модели и распространенная симметрично на южную полусферу (модель 1). Профиль, показанный пунктирной линией (модель 2) — это та же вариация, но со смещением к северу и югу на 15°. Мотивом к построению второго профиля послужило следую-

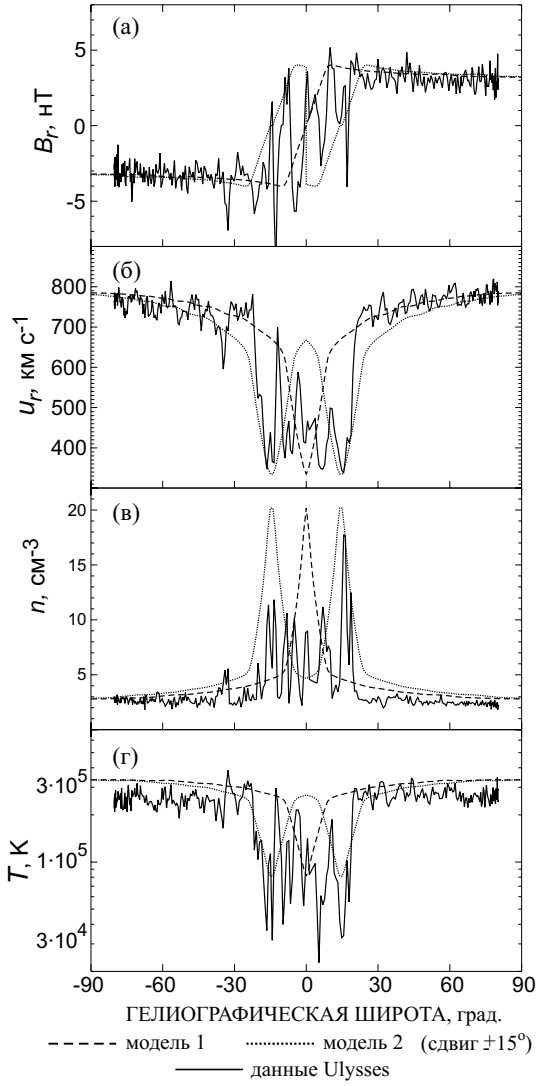

Рис. 4: Среднесуточные значения радиального магнитного поля (а), радиальной скорости (б), плотности (в) и плазменной температуры (г) по данным Ulysses (сплошные линии) в зависимости от гелиографической широты в сравнении с рассчитанными широтными профилями.

щее. Хотя структура гелиосферы в 1994–1995 гг. была более или менее осесимметричной, гелиосферный токовый слой все же не вполне совпадал с гелиоэкваториальной плоскостью, несколько отклоняясь от нее и формируя четырехсекторную структуру. В принципе, для описания этого эффекта необходима трехмерная модель, которая бы включала зависимость от ϕ-координаты. Однако усреднение этих отклонений по долготе приводит к эффективному расширению низкоскоростного пояса вокруг экватора. Таким образом, модель 2 есть ни что иное как попытка учесть эффект гофрированности ГТС.

Из рис. 4 очевидно, что имеет место приблизительное согласие рассчитанных и наблюденных профилей для каждого из четырех графиков, особенно для модели 2. Как величины, так и широтные вариации рассчитанных B_r, u_r, n и T в общем схожи с данными Ulysses. Бимодальная структура солнечного ветра (комбинация высокоскоростных униполярных и разреженных потоков с низкоскоростным и относительно плотным экваториальным ветром с переменной магнитной полярностью) и даже резкие изменения скорости достаточно хорошо воспроизведены моделью 2. Рассчитанные вариации являются однако очень плавными, тогда как наблюденные параметры претерпевают быстрые изменения, особенно заметные в области вокруг экватора. Эти изменения могут быть отнесены на счет как транзиентных процессов (таких как корональные выбросы массы), так и азимутальной асимметрии приэкваториальной области.

Неожиданным результатом наблюдений на Ulysses явилось отсутствие заметного градиента B_r относительно гелиошироты во время нахождения Ulysses в высокоскоростном солнечном ветре. Чтобы получить более полное представление о том, каким образом дипольное поле вблизи Солнца трансформируется в однородное по широте поле на больших расстояниях, на рис. 5 приведена рассчитанная радиальная эволюция широтных профилей B_r в диапазоне гелиоцентрических расстояний от $r = 1\ R_\odot$ до 5 а. е. Как видно из рис. 5, дипольный гра-

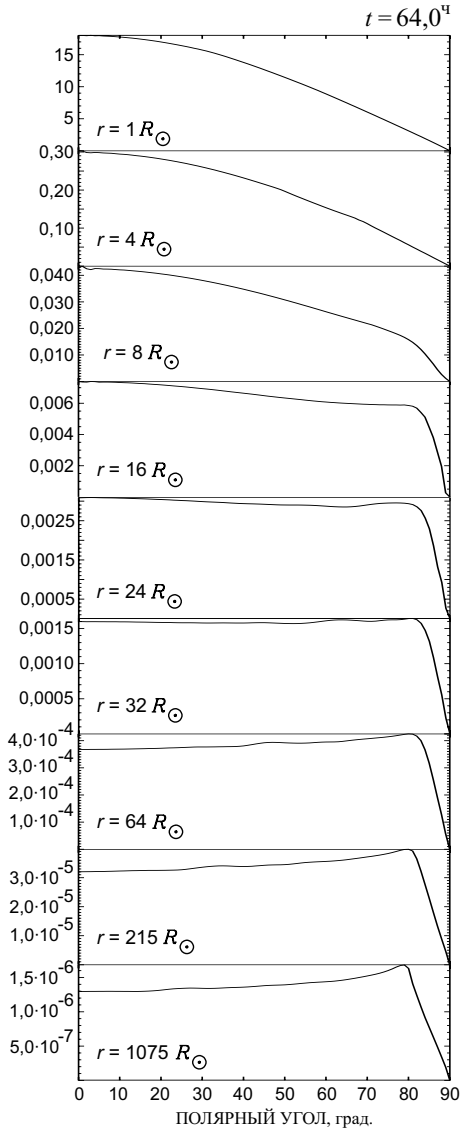

Рис. 5: Зависимость от широты радиальной компоненты магнитного поля на различных гелиоцентрических расстояниях от 1 $R_\odot$ до 5 а. е. (в гауссах).

диент B_r, который имеет место вблизи Солнца, не исчезает на больших расстояниях, а лишь перераспределяется по широте, ослабляясь вблизи полюса и концентрируясь вблизи экватора. Ясно видно также, что эта трансформация начинается при $r > 4\ R_\odot$ и в основном заканчивается к $r = 24\ R_\odot$. Заметим, что в области $r > 24\ R_\odot$ появляется небольшой градиент B_r в направлении экватора, который постепенно увеличивается с гелиоцентрическим расстоянием.

В последней 7 главе диссертации представлены результаты расчетов по трехмерной стационарной модели с альвеновскими волнами, обеспечивающими дополнительный нагрев и ускорение солнечного ветра в областях с открытой конфигурацией магнитного поля. Выполнены расчеты крупномасштабной структуры солнечного ветра в период максимума 21 цикла солнечной активности. Результаты расчетов для кэррингтоновского оборота 1677 (7 января – 3 февраля 1979 г.) сопоставлены с наблюдениями параметров плазмы и магнитного поля на космических аппаратах Helios 1, Helios 2, Pioneer Venus Orbiter (PVO), Voyager 1, Voyager 2 и IMP-8 в области гелиоцентрических расстояний от 0,5 до 7 а. е. Рассчитанные профили радиальной компоненты магнитного поля сравниваются с данными PVO и околоземных спутников.

Основные результаты работы

В заключении сформулированы основные результаты диссертации. Перечислим их:

1. Главным результатом работы является создание глобальной трехмерной модели солнечного ветра. Основа модели - численное самосогласованное решение магнитогидродинамических уравнений, описывающих течение солнечного ветра в политропном приближении. Расчетная область простирается от основания короны до нескольких астрономических единиц. Наблюдения фотосферного магнитного поля используются при задании граничных условий на внутренней границе расчетной области.

2. Разработан метод построения стационарного решения трехмерных МГД уравнений, заключающийся в разделении расчетной области на внутреннюю область I, где стационарное решение строится релаксационным методом, и внешнюю область II, где решение строится посредством интегрирования стационарных уравнений вдоль радиальной координаты. Граница между этими областями выбирается так, чтобы все особые точки стационарной системы уравнений располагались в области I. Для инициализации интегрирования во внешней области используется решение, полученное в области I на границе с областью II.

3. Построены решения трехмерных стационарных МГД уравнений в области между фотосферой Солнца и 10 а. е. Результаты расчетов сравниваются с данными наблюдений корональных дыр и спутниковыми измерениями на орбите Земли. Сравнение показывает качественное согласие рассчитанных и измеренных параметров. Результаты расчетов поддерживают концепцию корональных дыр как источника стационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра.

4. На основе трехмерной нестационарной модели исследована динамика солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в июне 1991 г. в области от 1 $R_\odot$ до ~1,5 а. е. Расчеты включают транзиентные возмущения, распространяющиеся через неоднородный фоновый солнечный ветер, от восьми интенсивных солнечных вспышек июня 1991 г. Фоновый ветер рассчитывается на основе трехмерной стационарной моделью. Параметры солнечного ветра и ММП, рассчитанные для гелиоцентрического положения Земли в течение 1–18 июня 1991 г., находятся в качественном согласии с доступными данными спутниковых наблюдений и вариацией K_p индекса геомагнитной активности.

5. Построены стационарные решения МГД уравнений в дву- и трехмерном случае с учетом альвеновских волн в ВКБ приближении. Показано, что учет эффектов альвеновских волн позволяет количественно воспроизвести распределение параметров в высокоскоростных потоках солнечного ветра.

6. На основе трехмерной стационарной модели с альвеновскими волнами выполнены расчеты структуры солнечного в период максимума 21 цикла солнечной активности. Результаты расчетов сопоставлены с данными наблюдений на космических аппаратах в интервале гелиоцентрических расстояний от 0,5 до 7 а. е. Показано, что в общем имеется согласие рассчитанных и наблюденных профилей.

7. Построены двумерные решения с учетом альвеновских волн, описывающие стационарные течения плазмы в магнитной конфигурации дипольного типа. Показано, что в эпоху минимума солнечной активности глобальная структура солнечного ветра формируется в результате истечения корональной плазмы из полярных областей Солнца ($|\phi| \leq 30°$) с пониженной плотностью. Источником как высокоскоростного, так и низкоскоростного солнечного ветра являются полярные области: высокоскоростной ветер является ядром потока, а периферийные области течения являются низкоскоростными. Высокоскоростной поток соответствует области, в которой расходимость силовых линий более или менее постоянна. Ближе к экватору, расходимость силовых линий резко возрастает и скорость падает. Радиальная скорость u_r монотонно возрастает в направлении центра высокоскоростного потока.

8. Сравнение решений, полученных с учетом и без учета альвеновских волн, показывает, что общая структура течения подобна в обоих случаях, однако количественно результаты заметно различаются: скорости течения на орбите Земли ниже, плотности выше, а угловая модуляция скорости менее выражена в случае без волн. Включение альвеновских волн позволяет количественно воспроизвести наблюдаемые распределения параметров в высокоскоростных потоках. Показано, что эффект нагрева плазмы вследствие затухания волн не существенен для ускорения течения и структуры магнитного поля.

9. Модельные расчеты воспроизводят бимодальную структуру солнечного ветра (комбинацию высокоскоростного униполярного и разреженного потока с низкоскоростным и относительно плотным эквато-

риальным ветром). Рассчитанные и наблюденные на Ulysses профили скорости, плотности, температуры и радиального магнитного поля находятся в количественном согласии. В согласии с наблюдениями на Ulysses, результаты расчетов демонстрируют: 1) отсутствие заметного градиента в распределении радиальной компоненты магнитного поля в полярных высокоскоростных потоках, 2) в этих потоках скорость меняется слабо, незначительно возрастая к центру потока.

10. В рамках осесимметричной модели показано, что меридиональная структура солнечного ветра определяется двумя динамическими процессами. Первичный из этих процессов — меридиональная релаксация и формирование плоских меридиональных профилей параметров течения и магнитного поля (вне экваториального пояса) в области, магнитные силы доминируют над градиентами теплового и волнового давления. Сила Ампера вызывает течение плазмы к экватору, которое перераспределяет магнитный поток по широте и создает пояс повышенной плотности вблизи экватора. В комбинации с направленным от Солнца течением корональной плазмы, этот процесс ведет к уменьшению градиентов и выполаживанию меридиональных профилей параметров магнитного поля и плазмы вне экваториального пояса, в котором концентрируются эти градиенты. Первичный процесс завершается на расстоянии, где плазменный параметр, рассчитанный по сумме теплового и волнового давлений, $\beta_T \approx 1$. Вторичный процесс — меридиональное перераспределение в результате действия направленного к полюсу градиента теплового давления, сформировавшегося в результате первичного процесса — начинается в области, где $\beta_T > 1$. Вторичный процесс вызывает сравнительно слабое направленное к полюсу течение плазмы, которое еще раз перераспределяет магнитный поток и плазму по широте. Следствиями вторичного процесса являются небольшой меридиональный градиент, который развивается в удаленном высокоскоростном ветре: возрастание радиальной скорости и

убывание радиального магнитного поля в направлении полюса.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Усманов, А. В., О связи параметров солнечного ветра и уровня геомагнитной активности, *Геомагнетизм и аэрономия*, **30**, 881–883, 1990.

2. Усманов, А. В., МГД-проецирование к Солнцу структуры солнечного ветра, наблюдаемой на орбите Земли, *Геомагнетизм и аэрономия*, **33**, 153–155, 1993.

3. Усманов, А. В., Вариации параметров солнечного ветра и геомагнитной возмущенности в 20-м и 21-м циклах солнечной активности, *Геомагнетизм и аэрономия*, **33**, 155–157, 1993.

4. Понявин, Д. И., А. В. Усманов, Годовые вариации соотношения B_x- и B_z-компонент ММП в GSEQ-, GSE, и GSM-системах координат, *Геомагнетизм и аэрономия*, **25**, 128–129, 1985.

5. Цыганенко, Н. А., А. В. Усманов, В. О. Папиташвили, Н. Е. Папиташвили, В. А. Попов, Пакет программ для расчетов геомагнитного поля и связанных с ним координатных систем, МГК АН СССР, Москва, 1987, 58 с.

6. М. И. Пудовкин, А. Графе, С. А. Зайцева, Л. З. Сизова, А. В. Усманов, Расчет поля D_{st}-вариации по параметрам солнечного ветра, Препринт ИЗМИРАН N 60(593), АН СССР, 24 с., 1985.

7. Usmanov, A. V., Numerical 2-D MHD modeling of the solar wind between the Sun and the Earth, In *Proceedings of the First SOLTIP Symposium*, Liblice, Csechoslovakia, 30 September–5 October, 1991, vol. 2, S. Fisher and M. Vandas, editors., p. 256–264, 1992.

8. Usmanov, A. V., Interplanetary magnetic field structure and solar wind parameters as inferred from solar magnetic field observations and by using a numerical 2-D MHD model, *Solar Phys.*, **143**, 345–363, 1993.

9. Usmanov, A. V., A global numerical 3-D MHD model of the solar

wind, *Solar Phys.*, **146**, 377–396, 1993.

10. Usmanov, A. V., The global structure of the solar wind in June 1991, *Solar Phys.*, **148**, 371–382, 1993.

11. Usmanov, A. V., Numerical 3-D MHD simulation of the solar wind, In *Proceedings of the International Workshop "The Solar Wind-Magnetosphere Interaction"*, Graz, Austria, September 23–25, 1992, H. K. Biernat, G. A. Bachmaier, S. J. Bauer, R. P. Rijnbeek, editors, pp. 23–32, 1994.

12. Usmanov, A. V., Numerical 3-D time-dependent MHD model of the solar wind, *Space Sci. Rev.*, **72**, 121–124, 1995.

13. Usmanov, A. V., A global three-dimensional, time-dependent MHD model of the solar wind, In *Proceedings of the Second SOLTIP Symposium*, 13–17 June 1994, Nakaminato, Japan, T. Watanabe, editor, STEP GBRSC News, **5**, p. 205–208, 1995.

14. Besser, B. P., H. I. M. Lichtenegger, A. V. Usmanov, and J. M. Fritzer, Global solar wind simulations around solar minimum (1985/86), *Adv. Space Research*, **16**, No. 9, (9)115-(9)118, 1995.

15. Pudovkin, M. I., A. Grafe, S. A. Zaitseva, L. Z. Sizova, and A. V. Usmanov. Calculating the D_{st}-variation field on the basis of solar wind parameters. Gerlands Beitr. Geophysik, Leipzig, **97**, 525–533, 1988.

16. Usmanov, A. V., and M. Dryer, A global 3-D simulation of interplanetary dynamics in June 1991, *Solar Physics*, **159**, 345–368, 1995.

17. Usmanov, A. V., and M. Dryer, June 1991: Global dynamics as inferred from three-dimensional, time-dependent MHD model, In *Proceedings of the Second SOLTIP Symposium*, 13–17 June 1994, Nakaminato, Japan, T. Watanabe, editor, STEP GBRSC News, **5**, p.59–62, 1995.

18. Usmanov, A. V., J. M. Fritzer, and B. P. Besser, ALF3D software-package for 3-D, steady-state MHD simulation of the solar wind, Institut für Weltraumforschung, Report IWF9501, Graz, Austria, 1995.

19. Usmanov, A. V., A global 3-D MHD solar wind model with

Alfvén waves, in *Proceedings of the Solar Wind 8 Conference*, edited by D. Winterhalter et al., eds., p. 141–144, American Institute of Physics, Woodbury, NY, 1996.

20. Usmanov, A. V., J. M. Fritzer, and B. P. Besser, Solar wind structure during solar maximum (1979): Model calculations and comparison with spacecraft data, in *Proceedings of the International Workshop "The Solar Wind - Magnetosphere System 2"*, Graz, Austria, September 27–29, 1995, p. 327–334, 1997.

21. Usmanov, A. V., 3-D MHD simulation of the solar wind between 1 $R_{\odot}$ and 1 AU, in *Proceedings of the Third SOLTIP Symposium*, edited by X. S. Feng et al., International Academic Publishers, p. 241–247. 1998.

22. Usmanov, A. V., A global MHD model of the solar wind: comparison with Ulysses data, in *Proceedings of the Solar Wind 9 Conference*, S. R. Habbal et al., eds., American Institute of Physics, Woodbury, NY, p. 397–400, 1999.

23. Usmanov, A. V., A MHD model of the solar wind, in *"Problems of Geospace 2"*, V. S. Semenov, H. K. Biernat, M. V. Kubyshkina, C. J. Farrugia, and S. Mühlbachler, eds., Österreichische Akademie der Wissenschaften, p. 49–54, Wien, 1999.