

На правах рукописи

ИЗМОДЕНОВ ВЛАДИСЛАВ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ГРАНИЦЕ
ГЕЛИОСФЕРЫ**

01.03.03 – Физика Солнца

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

МОСКВА - 2007

Работа выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Бережко Е.Г.

доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН, проф. Имшенник В.С.

доктор физико-математических наук,
профессор Курт В.Г.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова

Защита состоится 01 ноября 2007 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 003.113.03 при Институте Космических Исследований РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт Космических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Космических Исследований РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук



Буринская Т.М

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Структура и свойства внешней гелиосферы определяются характером взаимодействия солнечного ветра с межзвездным окружением Солнца – частично ионизованным локальным межзвездным облаком (ЛМО). ЛМО движется относительно Солнца со скоростью ~ 26 км/с, имеет температуру $\sim 10^4$ К и концентрацию частиц $\sim 0.2-0.3$ см $^{-3}$. Область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой принято называть гелиосферным интерфейсом. Внутренней границей гелиосферного интерфейса является гелиосферная ударная волна, которую космический аппарат (КА) Voyager 1 пересек в декабре 2004 года на расстоянии 94 а.е. До настоящего времени основная информация о структуре и свойствах гелиосферного интерфейса получена с помощью методов дистанционного зондирования. Дистанционное зондирование гелиосферного интерфейса проводится в основном с 1 а.е., но также и с больших гелиоцентрических расстояний (3-100 а.е.) на КА Ulysses, Voyager 1 и 2, Pioneer 10 и 11. В настоящее время к основным экспериментальным источникам информации о структуре гелиосферного интерфейса и физических процессах, происходящих в нём, можно отнести следующие данные:

- спектры поглощения в линии лайман-альфа, измеренные в направлении ближних звезд на космическом аппарате Hubble Space Telescope;
- измерения рассеянного солнечного лайман-альфа излучения на околоземных космических аппаратах OGO-5, Прогноз 5 и 6, SOHO, Hubble Space Telescope и др., на межпланетных космических станциях Gallileo, Cassini и др., а также на дальних космических аппаратах Voyager 1 и 2, Pioneer 10;
- прямые измерения параметров солнечного ветра (в частности, его скорости и температуры), проводимые на больших гелиоцентрических расстояниях на космическом аппарате Voyager 2;
- прямые измерения (на КА Ulysses) параметров атомов межзвездного гелия, проникающих внутрь гелиосферы сквозь область гелиосферного интерфейса;
- прямые измерения «захваченных» ионов. Захваченные ионы образуются внутри гелиосферы из межзвездных атомов вследствие процессов перезарядки и фотоионизации. Их энергетические спектры измеряются на космических аппаратах Ulysses и ACE;
- измерения аномальной компоненты космических лучей (АКЛ), которая образуется из части захваченных ионов, ускоренных до высоких энергий; АКЛ измерялись и измеряются на космических аппаратах Voyager 1 и 2, Pioneer 10 и 11, Ulysses, ACE, SAMPEX и Wind;

- измерения килогерцового ($\sim 2-3$ кГц) радиоизлучения на КА Voyager 1 и 2;
- измерения потоков энергичных нейтральных атомов (ЭНА) гелиосферного происхождения на космических аппаратах SOHO, Image, Mars-Express, Venus-Express. Свойства плазмы во внешней части гелиосферы будут изучены в ближайшее время с помощью измерения потоков ЭНА на космическом аппарате IBEX (Interstellar Boundary Explorer). Космический аппарат IBEX будет запущен NASA в 2008 году.

Для того чтобы на основе измерений с одной или нескольких астрономических единиц определить структуру гелиосферного интерфейса, исследовать происходящие в нем физические процессы, а также предсказать результаты будущих измерений *необходимо построение теоретической модели гелиосферного интерфейса.*

Исторически построение теоретической концепции гелиосферного интерфейса началось с работ Паркера (Parker, 1961) и Баранова, Краснобаева и Куликовского (1970). В этой модели в ньютоновском приближении тонкого слоя рассматривается взаимодействие двух сверхзвуковых газодинамических потоков. При этом взаимодействии образуются три поверхности разрыва: гелиопауза – контактная поверхность, разделяющая солнечный ветер и межзвездную среду, гелиосферная ударная волна в солнечном ветре, и головная ударная волна в межзвездной среде (рис.1).

Главная трудность в построении полной адекватной модели гелиосферного интерфейса состоит в многокомпонентной природе как локальной межзвездной среды, так и солнечного ветра. Локальное межзвездное облако состоит, по меньшей мере, из пяти компонент: плазмы (электроны, протоны, ионы гелия), атомов водорода, межзвездного магнитного поля и галактических космических лучей.

Плазменная компонента в гелиосфере состоит из частиц солнечного ветра (протонов, электронов, альфа-частиц и др.), захваченных ионов, АКЛ. Захваченные ионы начинают влиять на течение гелиосферной плазмы начиная с расстояний 20-30 а.е. от Солнца и далее, а АКЛ влияют на течение плазмы солнечного ветра как в окрестности гелиосферной ударной волны, так и в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой.

Для построения корректной многокомпонентной модели гелиосферного интерфейса необходимо выбрать адекватное теоретическое описание для каждой из компонент межзвездной среды и солнечного ветра. В частности, для описания движения межзвездных атомов внутри гелиосферы необходимо использовать кинетический подход, так как длина свободного пробега атомов водорода сопоставима с характерными размерами гелиосферного интерфейса (число Кнудсена по главному процессу резонансной перезарядки ~ 1).

Цели и задачи работы

Главной целью работы является детальное исследование физических процессов на границе гелиосферы¹ и построение математической кинетико-газодинамической модели гелиосферного интерфейса с учетом многокомпонентного характера солнечного ветра и межзвездной среды. На основе разработанных моделей гелиосферного интерфейса проводится анализ доступных экспериментальных данных. В частности, в работе проводится:

- 1) исследование эффектов, связанных с кинетическим характером движения межзвездных атомов как внутри гелиосферы, так и в области гелиосферного интерфейса;
- 2) исследование хвостовой области гелиосферного интерфейса в поисках ответа на фундаментальный вопрос: где находится граница гелиосферы, и до каких областей распространяется влияние солнечного ветра на окружающую его межзвездную среду?
- 3) исследование влияния солнечного цикла на структуру гелиосферного интерфейса и параметры межзвездных атомов внутри гелиосферы;
- 4) исследование влияния межзвездного магнитного поля на положения и формы гелиопаузы, гелиосферной и внешней ударных волн, а также на распределения межзвездных атомов и заряженной компоненты;
- 5) исследование влияния многокомпонентности солнечного ветра на распределение параметров плазмы и атомов в гелиосфере и на ее границе;
- 6) Исследование влияния аномальной и галактической компонент космических лучей на взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой;
- 7) исследование фильтрации межзвездных атомов кислорода и азота в области гелиосферного интерфейса;
- 8) анализ спектров поглощения в линии лайман-альфа на основе построенных кинетико-газодинамических моделей гелиосферного интерфейса;
- 9) интерпретация экспериментальных данных по рассеянному солнечному лайман-альфа излучению на космических аппаратах SOHO, Voyager и Pioneer;
- 10) анализ космического содержания межзвездных атомов (водорода, гелия, кислорода, азота) на основе измерений спектров захваченных ионов на космических аппаратах Ulysses и ACE;
- 11) анализ допустимых значений неизвестных параметров межзвездной среды (концентрации протонов и атомов водорода, величины

¹ Под гелиосферой будем понимать область занятую солнечным ветром. В диссертации рассматриваются области гелиосферы $r > 1$ а.е., где r – гелиоцентрическое расстояние.

и направления межзвездного магнитного поля) на основе информации о пересечении гелиосферной ударной волны космическим аппаратом Voyager 1;

12) вычисление теоретических спектров энергичных атомов гелиосферного происхождения. Спектры ЭНА будут измеряться на космическом аппарате IBEX.

Научная новизна работы

Научная новизна работы заключается в том, что впервые было проведено теоретическое исследование физических и газодинамических процессов в области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой в рамках двух и трехмерных кинетико-газодинамических моделей.

Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные положения:

1. Получено и проанализировано решение кинетического уравнения для межзвездных атомов в области взаимодействия и внутри гелиосферы, показан немаксвелловский характер функции распределения.

2. Исследовано влияние 11-летнего цикла солнечной активности на структуру гелиосферного интерфейса.

3. Впервые в кинетико-континуальной постановке теоретически исследовалось влияние направления межзвездного магнитного поля на структуру области взаимодействия и на распределение межзвездных атомов внутри гелиосферы.

4. Впервые дано количественное объяснение наблюдаемого (на КА SOHO) отклонения направления движения межзвездных атомов водорода внутри гелиосферы от направления движения локальной межзвездной среды.

5. Впервые исследовано влияние ионов гелия межзвездной среды, альфа-частиц солнечного ветра, галактической и аномальной компонент космических лучей, захваченных ионов на структуру гелиосферного интерфейса.

6. Впервые был получен ответ на вопрос: насколько далеко в межзвездное пространство распространяется влияние Солнца, или другими словами, насколько далеко распространяется гелиосфера.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, базируется на использовании общепризнанных моделей физических явлений, методов и подходов газовой динамики, проверенных численных методов. Все численные методы и программы, использованные при

получении результатов, тщательно проверялись на известных решениях и специальных тестах. Правильность выбранных теоретических подходов также подтверждается и тем, что ряд полученных в работе результатов хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными на разных космических аппаратах.

Практическая ценность

Практическая ценность диссертации состоит в том, что фактически удалось создать численную модель гелиосферного интерфейса, которая учитывает влияние всех основных компонент солнечного ветра и межзвездной среды и хорошо объясняет все существующие на сегодняшний день экспериментальные данные. Таким образом, разработанная модель границы гелиосферы может быть использована при разработке технических заданий новых космических аппаратов для запуска к дальним планетам солнечной системы, в область внешней гелиосферы и ее границы, а также в межзвездную среду. Представленные в диссертации результаты будут использованы при анализе результатов, полученных с космического аппарата IBEX (Interstellar Boundary Explorer), запуск которого планируется NASA на 2008 год.

Ценность диссертации состоит также в том, что разработанные в ней для гелиосферы методы и подходы могут быть применены для изучения «астросфер» вокруг других звезд, что имеет существенный интерес при изучении временной эволюции звездных ветров, и, в частности, эволюции солнечного ветра.

Апробация

Работы, вошедшие в диссертацию, обсуждались на семинарах Института Механики МГУ (рук. акад. Г.Г. Черный), Института Теплофизики Экстремальных Состояний РАН (рук. акад. В.Е. Фортов), Института Космических Исследований РАН (рук. чл.-корр. РАН Л.М. Зеленый), Лаборатории физической газовой динамики Института Проблем Механики РАН (рук. проф. В.Б. Баранов), Калифорнийского технологического института (США, рук. семинара акад. Э. Стоун), Института Аэронамики Национального центра научных исследований Франции, семинаре национальной лаборатории Jet Propulsion Laboratory (JPL) США, семинарах физического и аэрокосмического факультетов Университета Южной Калифорнии в Лос-Анжелесе, семинаре института геофизики и планетной физики Университета Калифорнии (Риверсайд, США).

Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- на конференциях «Ломоносовские чтения» МГУ 2004, 2005, 2006, 2007 годов;
- на 31, 34, 35, 36 научных ассамблеях КОСПАР (1996, 2002, 2004, 2006 гг.);
- на международной конференции «Солнечный ветер-11» (Канада, 2005), на международной конференции «Солнечный ветер-10» (Италия, 2002), на международной конференции «Солнечный ветер-9» (США, 1998);
- ежегодных конференциях американского геофизического общества (г. Сан Франциско, 1998, 1999, 2000, 2003, 2004, 2005);
- на Восьмом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001);
- на 34-м симпозиуме ESLAB «Трехмерная структура гелиосферы в солнечном максимуме»;
- 5-ой ежегодной конференции института геофизики и планетных исследований (Калифорния, США) «Физика внутреннего гелиошиса: данные Вояджер-1, теория, и будущие перспективы» (2006, США);
- на ежегодных конференциях Европейского геофизического общества (1998, 2005), на 10-ой европейской конференции по физике Солнца (Прага, 2002);
- коллоквиуме КОСПАР «Внешняя гелиосфера: перспективы исследований» (Потсдам, 2000);
- на международной конференции «Прогресс в космической газовой динамике» (Москва, 1999);
- на международном симпозиуме «Космическая плазма: прямые измерения и удаленная диагностика» (Москва, 1998).

Работы, вошедшие в диссертацию, были отмечены в 2006 г. медалью им. Я.Б. Зельдовича международного комитета по космическим исследованиям (КОСПАР) и Российской Академии наук, а также Шуваловской премией МГУ им. М.В. Ломоносова за 2006 г.

Публикации и личный вклад автора

Все представленные в диссертации результаты опубликованы в 46 статьях в ведущих рецензируемых журналах и сборниках. Все основные результаты диссертации опубликованы в журналах из перечня ВАК.

Вклад автора во все рассмотренные в диссертации задачи является основным. Автором осуществлялись: физические и математические постановки всех задач, вошедших в диссертационную работу; разработка

оригинального метода решения задачи о взаимодействии солнечного ветра с локальной межзвездной средой в нестационарной постановке; разработка численного метода и написание программы для решения кинетического уравнения для межзвездных атомов водорода в трехмерной постановке; проведение численных расчетов; анализ экспериментальных данных и их сравнение с результатами, полученными в рамках численных моделей; подготовка текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, десяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 265 страницах, включает в себя 37 рисунков, 153 библиографических ссылки.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, ее научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту.

Глава 1 диссертации посвящена историческому обзору работ, в которых изучается взаимодействие солнечного ветра с локальной межзвездной средой, а также описанию общей структуры границы гелиосферы.

Солнечный ветер как процесс расширения солнечной короны был теоретически предсказан Паркером (Parker, 1958). Два годами позже теоретическое предсказание Паркера было подтверждено экспериментально на космических аппаратах (Грингауз и др. 1960). Модель Паркера солнечного ветра имеет асимптотическое решение (при $r \rightarrow \infty$, где r – гелиоцентрическое расстояние), в котором солнечный ветер является гиперзвуковым потоком полностью ионизированной плазмы с постоянной радиальной скоростью $V_{sw} = const$ и плотностью, убывающей обратно пропорционально квадрату расстояния $\rho_{sw} \sim 1/r^2$. Возникает вопрос, как гиперзвуковое решение Паркера согласуется с параметрами окружающей Солнце межзвездной среды.

В 1961 году Паркером (Parker, 1961) были предложены первые гидродинамические модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. В 1970 году Барановым, Краснобаевым и Куликовским была предложена модель взаимодействия гиперзвукового звездного ветра с гиперзвуковым потоком межзвездной среды. В этой модели предполагалось, что локальная межзвездная среда, также как и солнечный ветер, является полностью ионизированной водородной плазмой,

а ее поток - гиперзвуковым относительно Солнца. Первое предположение позволило рассмотреть проблему в рамках модели сплошной среды (для заряженных частиц эффективное число Кнудсена $Kn = l/L \ll 1$, где l - длина свободного пробега, L - характерная длина задачи в рассматриваемой проблеме), а второе дало возможность решить задачу в ньютоновском приближении тонкого слоя.

Качественная картина течения в модели Баранова и др. (1970) состоит в следующем. Контактный разрыв, называемый гелиопаузой, отделяет солнечный ветер от межзвездной среды. Гелиопаузу можно рассматривать как препятствие, которое потоки солнечного ветра и межзвездной среды обтекают с внутренней и внешней сторон. Так как оба потока являются сверхзвуковыми, то образуются две ударных волны: головная ударная волна в межзвездной среде и гелиосферная ударная волна в солнечном ветре. На головной ударной волне тормозится и нагревается сверхзвуковой поток межзвездной среды. На гелиосферной ударной волне тормозится и нагревается сверхзвуковой солнечный ветер. В приближении тонкого слоя, используемого в модели Баранова и др. (1970), считалось, что расстояние между головной и гелиосферной ударными волнами мало по сравнению с расстоянием от гелиопаузы до Солнца. В дальнейшем Барановым, Лебедевым и Рудерманом (1979) было показано, что предположение о малой толщине слоя между ударными волнами по сравнению с гелиоцентрическим расстоянием до гелиопаузы не выполняется при реальных параметрах взаимодействующих потоков.

Первые модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой предполагали, что межзвездная среда является полностью ионизованной. Однако сразу после первых измерений ультрафиолетового излучения с помощью ракетных запусков появились идеи о возможном существовании атомов межзвездного водорода в гелиосфере. В работе Blum and Fahr (1970) было показано, что концепция зоны Стрёмгрена, как зоны ионизованного газа вокруг горячей звезды, не может быть применена к гелиосфере в случае движения межзвездных атомов относительно Солнца. Оценки показывали, что при скорости относительного движения 20 км/с около 90 % холодного межзвездного водорода проникает в гелиосферу не будучи ионизованным. В работах Vertaux & Vlamont (1971), Thomas & Krassa (1971) используя параллактический эффект было доказано, что область максимума измеряемого лайман-альфа излучения находится на нескольких астрономических единицах. Это соответствует случаю солнечного излучения, рассеянного на межзвездных атомах водорода. Было показано, что вектор относительной скорости межзвездных атомов лежит почти в плоскости эклиптики, а не под углом в 53° к ней, как это следовало из наблюдений движения Солнца относительно ближайших звезд.

Межзвездные атомы водорода могут проникать на расстояния нескольких астрономических единиц из-за того, что их длина свободного пробега больше или сравнима с характерным размером задачи ($Kl \geq l$) - расстоянием до гелиопаузы. В этом случае взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой не может быть описано только в рамках уравнений механики сплошной среды. Таким образом, оказалось, что модель Баранова и др. (1970) не может быть непосредственно применена к рассматриваемому явлению. Далее в диссертационной работе дается обзор основных работ по моделированию гелиосферного интерфейса, а также моделированию движения атомов водорода внутри гелиосферы.

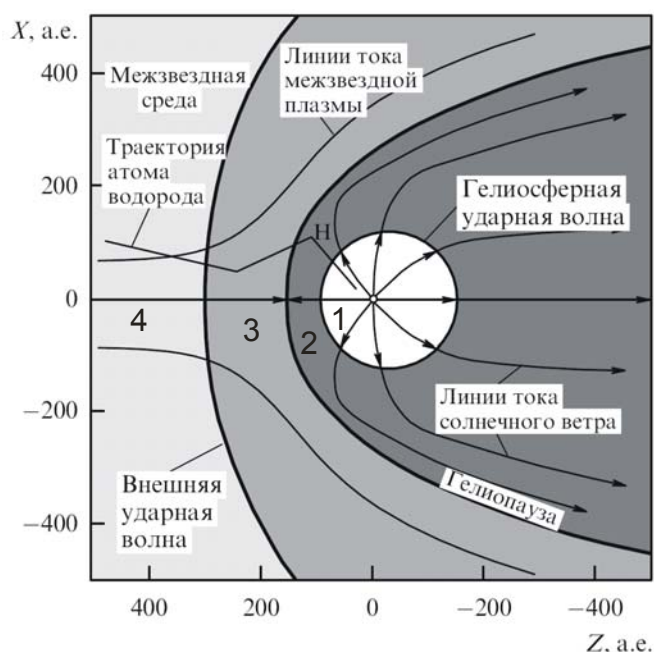


Рис. 1. Гелиосферный интерфейс - область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Гелиопауза - контактная поверхность, разделяющая плазму солнечного ветра от межзвездной плазмы. В гелиосферной ударной волне солнечный ветер тормозится от сверхзвуковых до дозвуковых (при $n_{H,\infty} \neq 0$), скоростей. Во внешней ударной волне тормозится и нагревается поток межзвездной среды. Область гелиосферного интерфейса может быть разделена на четыре подобласти, с существенно различными свойствами плазмы в них: 1) сверхзвуковой солнечной ветер; 2) область дозвукового солнечного ветра между гелиопаузой и гелиосферной ударной волной (эту область назовем внутренним ударным слоем); 3) область возмущенной межзвездной плазмы между гелиопаузой и внешней ударной волной (эту область часто называют внешним ударным слоем); 4) область сверхзвукового потока межзвездной среды.

Качественная картина границы гелиосферы. Сорта атомов в гелиосфере

В настоящее время доказано, что Солнце погружено в частично ионизованное локальное межзвездное облако (Lallement, 1996), которое

движется относительно солнечной системы. Наиболее точно скорость относительного движения межзвездной среды в окрестности Солнца ($V_{\infty} \sim 26.4 \text{ км с}^{-1}$) и его температуру ($T_{\infty} \sim 7000 \text{ К}$) удалось определить по прямым измерениям межзвездных атомов гелия на КА Ulysses (Witte, 2004, Moebius et al., 2004). При этом концентрации протонов (электронов) n_p и атомов водорода n_H оцениваются в диапазонах $n_{p,\infty} \sim 0.04-0.2 \text{ см}^{-3}$ и $n_{H,\infty} \sim 0.15-0.25 \text{ см}^{-3}$ (Lallement, 1996; Izmodenov et al., 1999a, 2004).

Качественная картина течения, возникающего при взаимодействии полностью ионизованной водородной плазмы солнечного ветра с частично ионизованной водородной плазмой локальной межзвездной среды, представлена на рис. 1. Ниже, для краткости, заряженную компоненту будем называть «плазменной компонентой» в отличие от нейтральной компоненты, представляющей собой поток атомов H (другие атомы практически не влияют на течение вследствие их малой концентрации по сравнению с концентрацией атомов водорода).

Гелиопауза и две ударные волны разбивают всю область гелиосферного интерфейса на четыре подобласти (рис. 1): (1) сверхзвуковой солнечный ветер; (2) солнечный ветер, разогретый в ударной волне; (3) разогретая в головной ударной волне плазменная компонента межзвездной среды; и (4) сверхзвуковой набегающий поток межзвездной среды. Области 2 и 3 обычно называются внутренним и внешним ударными слоями, соответственно.

В работе Izmodenov et al. (2000) были посчитаны транспортные сечения упругих столкновений атомов водорода между собой и с протонами. Показано, что они пренебрежимо малы по сравнению с сечением резонансной перезарядки. Таким образом, именно перезарядка является процессом, который определяет свойства атомов водорода в области интерфейса и внутри гелиосферы. Оценки (см., например, Izmodenov et al. 2000) показывают, что длина свободного пробега для атомов водорода одного порядка с характерным размером задачи (т.е. расстоянием до гелиопаузы), т.е. число Кнудсена по перезарядке $Kn \sim l/L \sim 0.5-1.0$. Таким образом, для корректного описания течения H-атомов в гелиосферном интерфейсе необходимо применять кинетический подход для всех сортов атомов. Атомы водорода проникают из локальной межзвездной среды в солнечную систему через поверхности сильного разрыва и, перезаряжаясь на протонах, оказывают влияние на движение плазменной компоненты.

Перезарядка в каждой из областей 1 – 4 приводит к образованию новых атомов H, имеющих параметры протонов в этих областях, и новых протонов с параметрами атомов H. Рожденные в процессе перезарядки атомы приобретают скорость протона - партнера по перезарядке. Таким образом, функция распределения вновь рожденных атомов зависит от локальных свойств плазмы в области их рождения. Так как область

гелиосферного интерфейса разделена двумя ударными волнами и гелиопаузой на четыре подобласти, то удобно различать четыре сорта атомов в зависимости от подобласти, где происходит их рождение. Атомами сорта 1 назовем атомы, которые родились в области сверхзвукового солнечного ветра до гелиосферной ударной волны (область 1). Атомами сорта 2 - атомы, рожденные в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой (область 2). Атомами сорта 3 - вторичные межзвездные атомы, рожденные в области внешнего ударного слоя между гелиопаузой и внешней ударной волной. Атомы водорода невозмущенной межзвездной среды будем приписывать к сорту 4.

Модель Баранова-Маламы

В работе Баранова и Маламы (Baranov & Malama, 1993) была представлена первая самосогласованная кинетико-газодинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. В модели Баранова-Маламы для описания плазменной компоненты использовались уравнения Эйлера с «источниковыми» членами, учитывающими влияние резонансной перезарядки. В стационарном случае эти уравнения имеют вид:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{V} = 0, \quad (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} + \frac{1}{\rho} \nabla p = \mathbf{F}_1[f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}), p, \mathbf{V}, \rho] \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot [\rho \mathbf{V} (\varepsilon + \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2})] = F_2[f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H), p, \mathbf{V}, \rho], \quad p = (\gamma - 1) \rho \varepsilon$$

Здесь p , ρ , ε и \mathbf{V} - давление, плотность, внутренняя энергия и вектор скорости плазменной компоненты соответственно, \mathbf{F}_1 и F_2 - источники импульса и энергии в плазменной компоненте вследствие процессов резонансной перезарядки, $f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)$ - функция распределения атомов водорода, зависящая от радиуса-вектора \mathbf{r} и вектора индивидуальной скорости \mathbf{w}_H атома, $\gamma=5/3$ - отношение удельных теплоемкостей для полностью ионизованной водородной плазмы. Для описания движения нейтральной компоненты решалось кинетическое уравнение для функции распределения атомов водорода, f_H :

$$\mathbf{w}_H \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{r}} + \left[\frac{(\mathbf{F}_r + \mathbf{F}_g)}{m_H} \right] \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{w}_H} = f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}'_H - \mathbf{w}_H| \sigma_f(\mathbf{r}, \mathbf{w}'_H) d\mathbf{w}'_H -$$

$$- f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \sigma_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_p \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) является линейным, поскольку функция распределения протонов $f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p)$ считается локально-максвелловской с газодинамическими значениями вектора скорости $\mathbf{V}(\mathbf{r})$, температуры $T(\mathbf{r})$ и плотности $\rho(\mathbf{r})$, \mathbf{w}_p - вектор индивидуальной скорости протона, $\sigma(|\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p|)$ - эффективное сечение перезарядки; \mathbf{F}_r и \mathbf{F}_g - силы солнечного радиационного

отталкивания и гравитационного притяжения соответственно. Уравнение (1.2) решалось методом Монте-Карло с расщеплением траекторий (Malama, 1991).

«Источниковые» члены в правых частях уравнений (1.1) вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= \frac{1}{n_p} \int d\mathbf{w}_H \int d\mathbf{w}_p \sigma |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| (\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p), \\
 F_2 &= m_H \int d\mathbf{w}_H \int d\mathbf{w}_p \sigma |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \left(\frac{w_H^2}{2} - \frac{w_p^2}{2} \right) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p), \\
 n_H &= \int d\mathbf{w}_H f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H), n_p = \int d\mathbf{w}_p f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p).
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Для того чтобы использовать уравнения идеальной газовой динамики в «одножидкостном» приближении для плазменной компоненты в форме (1.1), необходимо предположить, что 1) температуры электронов и протонов одинаковы; 2) образовавшиеся в результате перезарядки протоны сразу же принимают скорость и температуру плазменной компоненты (происходит их мгновенный «захват» плазмой или их мгновенная «релаксация»), и 3) функция распределения протонов - локально-максвелловская.

В качестве граничных условий для плазменной компоненты использовались постоянные значения скорости V_E , концентрации электронов (протонов) n_E и число Маха M_E на орбите Земли (индекс «E»), а также значения этих же параметров в локальной межзвездной среде (индекс «∞»). Для атомов водорода предполагалось, что их функция распределения в межзвездной среде является максвелловской с концентрацией $n_{H,\infty}$ и значениями температуры и скорости, равными значениям этих параметров для плазменной компоненты. Кроме того, необходимо задать отношение $\mu = F_r/F_g$ силы солнечного радиационного отталкивания к силе солнечной гравитации, которое в работе Baranov & Malama (1993) полагалась близкой к 1.

В рамках модели Баранова-Маламы были получены следующие важные результаты:

1. Вследствие процесса перезарядки гелиоцентрическое расстояние до ударных волн и гелиопаузы сильно уменьшается. Исчезает сложная структура течения в хвостовой области, состоящая из диска Маха, тангенциального разрыва и отраженной ударной волны. Расстояние до гелиосферной ударной волны в направлении набегающего потока межзвездной среды составляет порядка 100 а.е. Последний результат подтвердился в 2004 г., когда КА Voyager 1 пересек гелиосферную ударную волну на расстоянии 94 а.е.

2. Процесс перезарядки приводит к уменьшению скорости солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны примерно на 10%, а также к его разогреву.

3. Процесс перезарядки межзвездных протонов на энергичных атомах водорода приводит к возмущению сверхзвукового потока межзвездной среды до головной ударной волны (область 4 на рис.1).

4. В результате перезарядки первичных атомов водорода на межзвездных протонах образуется водородная стенка – увеличение концентрации атомов водорода в области между гелиопаузой и внешней ударной волной. Водородная стенка была обнаружена при интерпретации спектров поглощения в линии лайман-альфа, измеренных на Hubble Space Telescope (HST) в направлении ближних звезд.

Глава 2 диссертации посвящена исследованию эволюции функции распределения атомов водорода в области гелиосферного интерфейса.

Роль, которую играют межзвездные атомы водорода внутри гелиосферы, а также в области гелиосферного интерфейса, трудно переоценить. Они, как следует из модели Баранова-Маламы, динамически влияют на структуру гелиосферного интерфейса, положения гелиопаузы и ударных волн. Межзвездные атомы являются прародителями захваченных ионов и АКЛ в гелиосфере. Также вся основная информация о структуре границы гелиосферы связана с измерениями (прямыми или косвенными) межзвездных атомов и частиц, являющихся их производными. В силу кинетического характера движения межзвездных атомов в области гелиосферного интерфейса для корректной интерпретации данных необходимо знать функцию распределения атомов по скоростям.

В работе Баранова и др. (Baranov, Izmodenov, Malama, 1998) для различных сортов межзвездных атомов водорода были рассчитаны кинетические температуры в направлении набегающего потока межзвездной среды и в направлении перпендикулярном этому потоку:

$$T_{H,Z} = \frac{1}{kn_H} \int (w_{H,Z} - V_{H,Z})^2 f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H,$$

$$T_{H,X} = \frac{1}{kn_H} \int (w_{H,X} - V_{H,X})^2 f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) d\mathbf{w}_H.$$

Было показано, что отношение этих температур, T_x/T_z , существенно отличается от 1, что является доказательством явной немаксвелловости функции распределения атомов водорода в гелиосферном интерфейсе. В работе Baranov, Izmodenov, Malama (1998) была отмечена неправомерность многожидкостного подхода, когда для описания распределения атомов водорода в гелиосфере решаются гидродинамические уравнения для различных сортов атомов. Такой многожидкостной подход использовался несколькими западными группами (Zank et al., 1996; Fahr et al., 2000) для моделирования гелиосферного интерфейса. В работе Baranov, Izmodenov, Malama (1998) приведены примеры, когда использование многожидкостного подхода к описанию течения атомов водорода,

приводит к качественно другим результатам. Более детальное сравнение результатов модели Баранова-Маламы с различными многожидкостными подходами было сделано в работе Alexashov & Izmodenov (2005).

Анализ эволюции функции распределения различных сортов атомов водорода в области гелиосферного интерфейса был проведен в работах Izmodenov (2001), Izmodenov et al. (2001a). Функция распределения по скоростям для H-атомов $f_H(\vec{r}, \vec{w}_H, t)$ определяется из решения кинетического уравнения:

$$\mathbf{w}_H \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m_H} \cdot \frac{\partial f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H)}{\partial \mathbf{w}_H} = f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}'_H - \mathbf{w}_H| \sigma_{ex}^{HP} f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}'_H) d\mathbf{w}'_H - \\ - f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \int |\mathbf{w}_H - \mathbf{w}_p| \sigma_{ex}^{HP} f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p) d\mathbf{w}_p - (v_{ph} + v_{impact}) f_H(\mathbf{r}, \mathbf{w}_H) \quad (2.1)$$

Обозначения здесь такие же как и в (1.2). Помимо перезарядки, в уравнении (2.1) учитываются и другие физические процессы, влияющие на распределение атомов водорода в гелиосфере. Это фотоионизация, солнечное гравитационное притяжение, радиационное давление солнечного излучения, которые влияют на распределения атомов в окрестности Солнца, а также ионизация электронным ударом, которая влияет на распределение атомов в области внутреннего ударного слоя (Baranov & Malama, 1996; Izmodenov et al., 2004; Malama, Izmodenov, Chalov, 2006). В качестве граничного условия принималась максвелловская функция распределения для атомов водорода в невозмущенной межзвездной среде. Функция распределения протонов $f_p(\mathbf{r}, \mathbf{w}_p)$ принималась локально-максвелловской, а распределения концентрации, $n_p(\mathbf{r})$, скорости, $V_p(\mathbf{r})$, и температуры $T_p(\mathbf{r})$ были получены в рамках модели Баранова-Маламы.

Функцию распределения H-атомов можно представить как сумму функций распределения введенных ранее сортов: $f_H = f_{H,1} + f_{H,2} + f_{H,3} + f_{H,4}$. Метод Монте-Карло позволяет рассчитать функции распределения для каждого из этих четырех сортов. Функции распределения атомов водорода были вычислены и приведены для 12 характерных точек гелиосферного интерфейса в работах Izmodenov (2001), Izmodenov et al. (2001a). В качестве примера на рис. 2В показаны функции распределения четырех сортов H-атомов в окрестности гелиосферной ударной волны (~90 а.е.) в направлении набегающего потока межзвездной среды. На рис. 2А для удобства показаны распределения концентраций различных сортов атомов в зависимости от гелиоцентрического расстояния. В результате анализа эволюции функции распределения были сделаны следующие выводы (Izmodenov 2001; Izmodenov et al. 2001a):

- Функция распределения атомов водорода не является максвелловской ни внутри гелиосферы, ни в области гелиосферного интерфейса. Особенно сильные изменения функции распределения

происходят в областях близких к Солнцу ($r < 10$ а.е.), а также в области гелиосферного интерфейса.

- Эффективное увеличение на $\sim 10\%$ массовой скорости первичных межзвездных атомов (псевдоускорение) в области гелиосферного интерфейса происходит вследствие того, что перезарядка происходит более интенсивно на атомах, обладающих меньшими скоростями, чем на относительно быстрых атомах. Этот кинетический эффект, называемый в литературе «селекцией», приводит к отклонению функции распределения первичных атомов от максвелловской (рис. 2В-4).

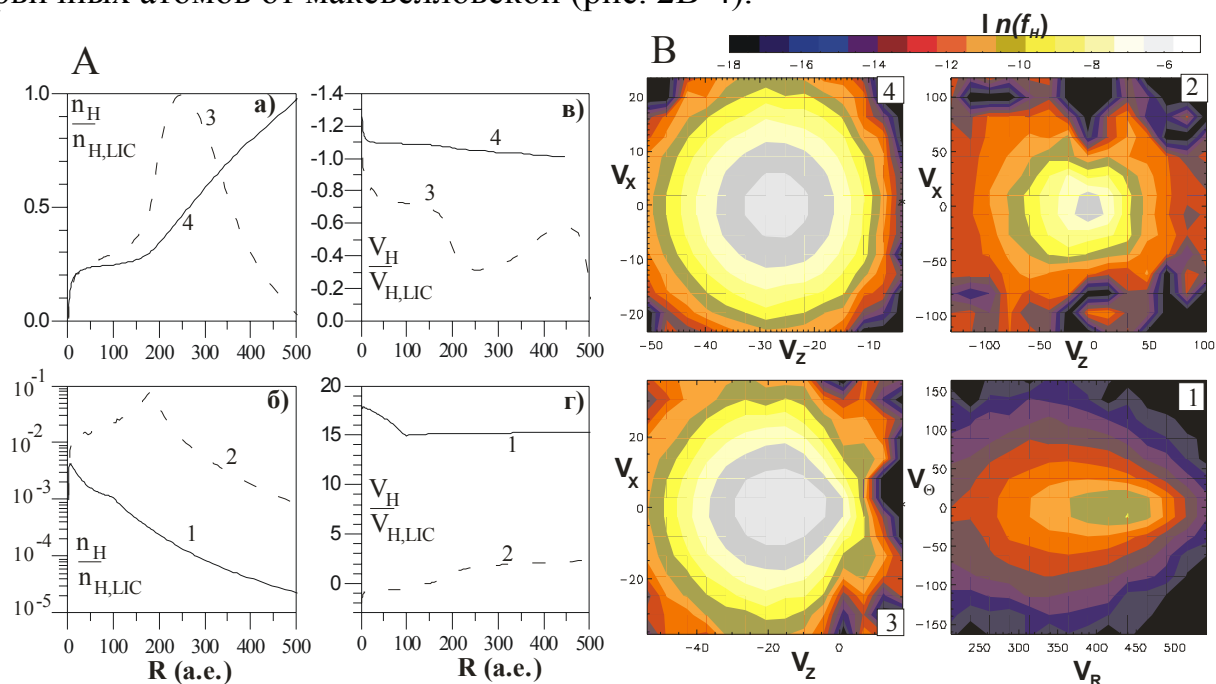


Рис. 2 А. Концентрации и скорости четырех сортов атомов водорода в гелиосферном интерфейсе как функции гелиоцентрического расстояния в направлении к набегающему потоку ЛМС. Кривые 1 соответствуют атомам, рожденным в области сверхзвукового солнечного ветра (сорт 1), кривые 2 - атомам, рожденным в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой (сорт 2), кривые 3 - атомам, рожденным в области внешнего ударного слоя (сорт 3). Кривые 4 соответствуют первичным межзвездным атомам. Концентрации отнесены к концентрации нейтралов в ЛМС, а скорости отнесены к скорости движения ЛМС относительно Солнца.

Рис. 2 В. Функции распределения четырех сортов H-атомов в окрестности гелиосферной ударной волны по направлению к набегающему потоку ЛМС: (1)-(4) соответствуют атомы сортов 1-4, V_z - проекция вектора скорости на ось параллельную вектору скорости относительного движения Солнца и ЛМС, V_{LIC} . Отрицательные значения означают приближение к Солнцу. V_r - радиальная компонента вектора проекции скорости на плоскость перпендикулярную вектору V_{LIC} . В расчетах предполагалось, что $n_{H,LIC} = 0.2 \text{ cm}^{-3}$, $n_{p,LIC} = 0.04 \text{ cm}^{-3}$.

- Функция распределения вторичных межзвездных атомов (сорт 3) также отлична от максвелловской (рис. 2В-3) и также сильно меняется с расстоянием. Атомы сорта 3 имеют меньшую скорость и большую

температуру по сравнению с первичными межзвездными атомами, что и обеспечивает возможность определения водородной стенки в спектрах поглощения ближних звезд. Средняя массовая скорость атомов этого сорта в окрестности гелиосферной ударной волны -18-19 км/с (знак 'минус' означает, что атомы движутся по направлению к Солнцу). В области сверхзвукового солнечного ветра до гелиосферной ударной волны концентрации первичных и вторичных межзвездных атомов имеют один порядок, но их отношение может меняться в зависимости от степени ионизации ЛМС, принимаемой в расчетах (Izmodenov et al., 1999a).

- Атомы сорта 2 образуются из горячих протонов и захваченных ионов солнечного ветра, сжатого в гелиосферной ударной волне. Концентрация Н-атомов этого сорта на порядок меньше по сравнению с концентрациями сортов 3 и 4 (первичных и вторичных межзвездных атомов), поэтому Н-атомы сорта 2 не влияют на интерпретацию экспериментов по рассеянному Лайман-альфа излучению и захваченных ионов внутри гелиосферы. Обладая большими энергиями и длинами свободного пробега, часть атомов сорта 2 проникает в области вверх по потоку ЛМС от внешней ударной волны. Перезарядка Н-атомов на межзвездных протонах приводит к возмущению сверхзвукового потока ЛМС на больших гелиоцентрических расстояниях. В сверхзвуковом солнечном ветре внутри гелиосферной ударной волны Н-атомы второго сорта распространяются свободно, без изменений их свойств. В 2008 году спектры атомов сорта 2 будут измерены на космическом аппарате Interstellar Boundary Explorer.

- Функция распределения по скоростям Н-атомов сорта 1 также не является максвелловской. Увеличенный "хвост" в функции распределения связан с эффектом торможения сверхзвукового солнечного ветра до прохождения им гелиосферной ударной волны.

В **главе 3** проводится исследование хвостовой области гелиосферы. Основная цель этого исследования - поиск ответа на фундаментальный вопрос: где находится граница гелиосферы и до каких областей распространяется влияние солнечного ветра на окружающую межзвездную среду? Для ответа на первый вопрос необходимо определить, что называется границей гелиосферы. За границу гелиосферы естественно принять гелиопаузу, отделяющую плазму солнечного ветра от плазмы межзвездной среды. Однако такое определение некорректно, поскольку гелиопауза - незамкнутая поверхность, и хвостовая часть гелиосферы распространялась бы до бесконечности при отсутствии перемешивания между плазмой солнечного ветра и потоком газа межзвездной среды на больших гелиоцентрических расстояниях. Чтобы разрешить эту проблему, а также ответить на второй вопрос, в работах Измоденова и Алекашова (2003), Alexashov et al. (2004) было проведено детальное исследование

структуры хвостовой части гелиосферного интерфейса на больших (до 50000 а.е.) гелиоцентрических расстояниях.

Результаты проведенных расчетов представлены на рис. 3. Сразу после прохождения гелиосферной ударной волны TS плазма солнечного ветра имеет дозвуковую скорость ~ 100 км/с и температуру $\sim 1.5 \cdot 10^6$ К. Затем скорость солнечного ветра еще больше уменьшается из-за «нагружения» новыми протонами, рожденными в результате перезарядки, и постепенно приближается к значению скорости в невозмущенном потоке межзвездного газа ($V_\infty \sim 25$ км/с). Так как температура межзвездных атомов много меньше температуры протонов за гелиосферной ударной волной, то перезарядка приводит к эффективному охлаждению солнечного ветра в хвосте. В результате такого охлаждения число Маха в солнечном ветре увеличивается, и на расстоянии ~ 4000 а.е. он снова становится сверхзвуковым².

Параметры плазмы и H-атомов приближаются к их значениям в локальной межзвездной среде с дальнейшим увеличением расстояния от Солнца. Получено, что на расстояниях $\sim 40 - 50$ тыс. а.е. параметры солнечного ветра практически неотличимы от параметров невозмущенной межзвездной среды. Такие расстояния можно считать границей гелиосферы в хвостовой области. Скачок плотности и касательной компоненты скорости на тангенциальном разрыве (HP) практически исчезает на гораздо меньших гелиоцентрических расстояниях (~ 3000 а.е.).

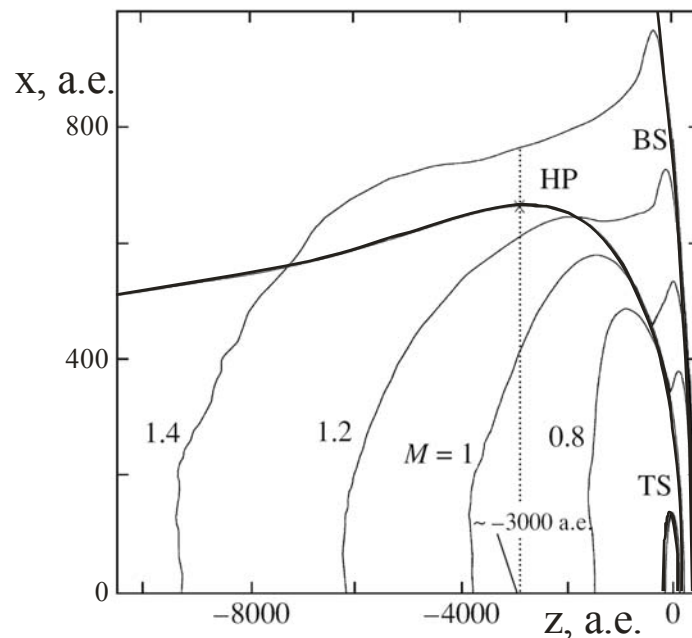


Рис. 3. Изолинии числа Маха плазмы солнечного ветра и межзвездной среды в

² Заметим, что сверхзвуковой характер истечения солнечного ветра через границу расчетной области в хвостовой области фактически снимает вопрос о постановке корректных граничных условий, существующий в случае дозвукового истечения.

хвостовой области гелиосферного интерфейса. Полуужирными линиями показаны поверхности сильного разрыва BS, TS и HP.

В **главе 4** исследуется влияние межзвездного гелия и альфа частиц солнечного ветра на структуру гелиосферного интерфейса и положения ударных волн и гелиопаузы. Актуальность этого исследования связана с недавними успешными измерениями: а) параметров межзвездных атомов гелия, б) захваченных ионов гелия, в) степени ионизации гелия в ЛМС. В результате появилась возможность оценить плотность ионов гелия межзвездной среды в окрестности Солнца. Оказалось, что концентрация ионов гелия находится в диапазоне $0.008-0.01 \text{ см}^{-3}$ и динамическое давление ионов гелия сопоставимо с динамическим давлением протонов. Влияние межзвездного гелия на гелиосферный интерфейс исследовалось в работе Izmodenov et al. (2003a). Одновременно в работе также учитывалось влияние альфа-частиц солнечного ветра, концентрация которых составляет 2.5 - 5 % от концентрации протонов солнечного ветра. Динамическое давление альфа-частиц в солнечном ветре составляет 10 - 20 % от динамического давления протонов солнечного ветра. В работе Izmodenov et al. (2003a) было проведено параметрическое исследование и изучено влияние ионов гелия на положение ударных волн и гелиопаузы. Показано, что влияния межзвездных ионов гелия и альфа частиц солнечного ветра частично компенсируют друг друга. В модели, которая учитывает и ионы гелия и альфа-частицы, гелиопауза, гелиосферная ударная волна и внешняя ударная волна находятся ближе к Солнцу на $\sim 12 \text{ а.е.}$, $\sim 2 \text{ а.е.}$, $\sim 30 \text{ а.е.}$ соответственно, по сравнению с моделью Баранова-Маламы. Даже такие небольшие изменения в положении ударных волн и гелиопаузы важны для интерпретации измерений, полученных на аппаратах Voyager 1 и 2, которые удаляются от Солнца со скоростью $\sim 3.5 \text{ а.е./год}$. Учет ионов гелия и альфа-частиц солнечного ветра практически не влияет на фильтрацию H-атомов в гелиосферном интерфейсе.

В **главе 5** исследуется влияние 11-летнего цикла солнечной активности на область гелиосферного интерфейса. Динамическое давление солнечного ветра меняется примерно в два раза при переходе от максимума солнечной активности к её минимуму. В работах Izmodenov et al. (2003b, 2005a, 2007), Izmodenov & Malama (2004) получено решение самосогласованной нестационарной задачи о взаимодействии двухкомпонентной (плазменная компонента и H-атомы) межзвездной среды с солнечным ветром в осесимметричном приближении. Были получены самосогласованные решения нестационарных уравнений газовой динамики для плазмы совместно с нестационарным кинетическим уравнением для H-атомов. Кинетическое уравнение решалось методом Монте-Карло с расщеплением

траекторий. В качестве граничных условий принимались меняющиеся с солнечным циклом значения параметров на орбите Земли.

В работе Izmodenov et al. (2003b) представлены результаты для «идеального» солнечного цикла, в котором динамическое давление солнечного ветра менялось по синусоидальному закону с амплитудой колебаний 2 и периодом в 11 лет:

- Положения гелиопаузы и ударных волн меняются с 11-летней периодичностью. Вдоль оси симметрии амплитуды колебаний гелиосферной ударной волны (TS), гелиопаузы (HP) и головной ударной волны (BS) равны соответственно ~ 7.5 а.е., ~ 2 а.е. и < 0.7 а.е. Амплитуда колебаний TS растет по мере движения от лобовой части гелиосферы в хвостовую и достигает там 25 а.е. При этом колебания в лобовой и хвостовой частях находятся практически в противофазе.

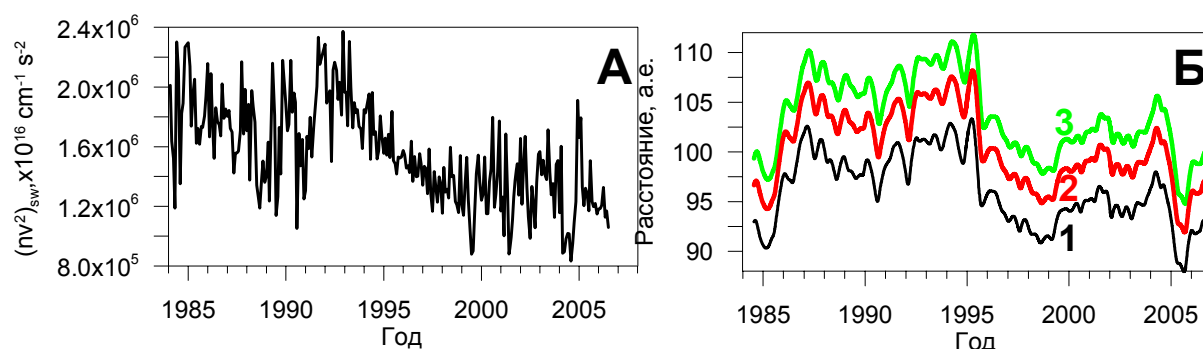


Рис. 4. А. Динамическое давление солнечного ветра на орбите Земли (данные OMNI-2). Б. Положение гелиосферной ударной волны в направлениях: набегающего потока межзвездной среды (кривая 1), КА Voyager 1 (кривая 2), и КА Voyager 2 (кривая 3).

- Параметры плазмы и атомов совершают колебания с 11-летним периодом во всей области интерфейса. Других периодов колебаний обнаружено не было. Во внешних областях солнечного ветра, и, в частности, в окрестности ударной волны TS флуктуации плотности первичных и вторичных межзвездных Н-атомов (4-го и 3-го сортов) находятся в пределах $\pm 5\%$ от их среднего значения. Такой же уровень колебаний характерен и для атомов сорта 2. Флуктуации концентрации Н-атомов сорта 1 составляют $\pm 30\%$ от их средних значений. Расчеты также показали, что флуктуации средней массовой скорости и «эффективной» температуры Н-атомов сортов 3 и 4 (осредненных по неравновесной функции распределения) пренебрежимо малы. Средняя же массовая скорость и кинетическая температура атомов сорта 2 меняются в течение солнечного цикла на 10-12%.

- В солнечном ветре длина волны колебаний больше, чем расстояние от Солнца до гелиосферной ударной волны (TS) и расстояние от TS до гелиопаузы (HP) в головной части гелиосферы. Ситуация существенно меняется в области внешнего ударного слоя (между гелиопаузой и

головной ударной волной). Движение гелиопаузы действует на межзвездную среду аналогично поршню, движущемуся в заполненной газом трубе, и приводит к образованию серии ударных волн и волн разрежения. Амплитуда ударных волн и волн разрежения уменьшается по мере их распространения в направлении от Солнца, что объясняется расходящимся характером движения. Характерная длина волн в головной части составляет ~ 40 а.е.

Далее в главе 5 приводятся и обсуждаются результаты расчетов с реальным солнечным циклом, когда значения параметров солнечного ветра брались на основе данных с космических аппаратов (рис. 4).

В **главе 6** исследуется влияние межзвездного магнитного поля на структуру гелиосферного интерфейса в общем трехмерном случае. В работах Izmodenov et al. (2005b), Izmodenov & Alexashov (2006) предложена модель, в которой магнитогидродинамические уравнения для плазменной компоненты решаются совместно с кинетическим уравнением для межзвездных атомах водорода. В работе Izmodenov et al. (2005b) представлены результаты расчетов для случая, когда межзвездное магнитное поле находится под углом $\theta=45^\circ$ к направлению набегающего потока. На рис. 5 показаны рассчитанные положения поверхностей сильного разрыва (ударных волн TS и BS и тангенциального разрыва или гелиопаузы HP) в плоскости xz , определяемой векторами \mathbf{V}_∞ и \mathbf{B}_∞ . При этом направление оси z противоположно направлению вектора \mathbf{V}_∞ , а ось x – перпендикулярна этому направлению. Полученное решение существенно отличается от осесимметричного.

Учет влияния магнитного поля приводит к приближению к Солнцу ударной волны TS и к удалению головной ударной волны BS. Гелиоцентрическое расстояние до гелиопаузы HP зависит от относительной величины магнитного давления и магнитного натяжения. В областях, где магнитное натяжение превосходит магнитное давление, гелиопауза удаляется от Солнца. Вдоль оси z ударная волна TS и гелиопауза HP приближаются к Солнцу на 10 и 20 а.е. соответственно. Расчеты показывают, что точка торможения на гелиопаузе находится выше оси z примерно на 10° . В окрестности этой точки плотность плазменной компоненты межзвездной среды достигает своего максимума, а ее вектор скорости имеет значительную компоненту V_x вдоль оси x . Поскольку параметры атомов H сорта 3 отражают параметры плазмы в области внешнего ударного слоя, то они также должны иметь составляющую скорости вдоль оси x . При этом, как и следовало ожидать, именно вблизи точки торможения образуется водородная стенка с максимальной интенсивностью.

Вектор средней скорости атомов водорода \mathbf{V}_H вычислялся как момент функции распределения f_H . Его компонента вдоль оси x отлична от нуля

даже на малых гелиоцентрических расстояниях. Угол между средней скоростью движения атомов водорода внутри гелиосферы и направлением движения межзвездной среды в расчетах составил $3-5^{\circ}$. Такое же отклонение направления движения атомов водорода было недавно обнаружено по измерениям рассеянного солнечного излучения в Лайман-альфа на космическом аппарате SOHO, что объясняется возможным влиянием межзвездного магнитного поля.

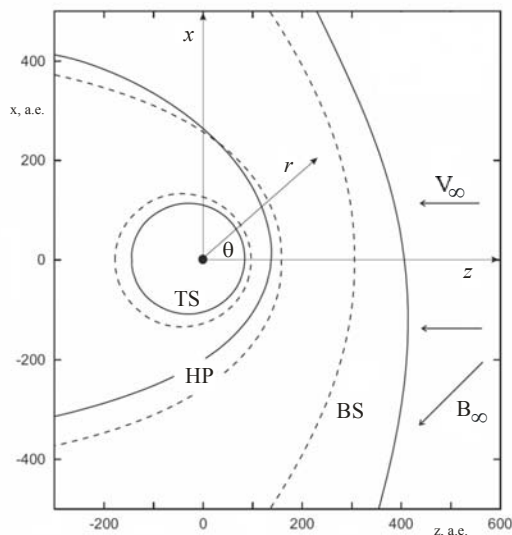


Рис. 5 Положение гелиопаузы (HP), гелиосферной ударной волны (TS) и внешней ударной волны (BS) в модели с учетом межзвездного магнитного поля (Izmodenov et al., 2005b). Для сравнения штриховыми линиями показаны результаты расчетов без учета магнитного поля ($B_{\infty} = 0$).

В **главе 7** исследуется влияние неравновесности «захваченных» протонов и солнечных протонов в солнечном ветре. В модели Баранова-Маламы для заряженной компоненты используется одножидкостное приближение. Однако измерения функции распределения захваченных протонов на космических аппаратах Ulysses и ACE показали, что функция распределения захваченных протонов немаксвелловская, хотя и изотропна. Эти данные привели к выводу об отсутствии термодинамического равновесия между протонами захваченными и солнечного происхождения при равенстве их средних скоростей.

В главе описывается усовершенствованная модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой, в которой захваченные протоны рассматриваются как отдельная компонента с отличными от солнечного ветра термодинамическими параметрами (Malama et al., 2006). Предполагается, что в системе координат, связанной с солнечным ветром, функция распределения захваченных протонов изотропна и для нее решается кинетическое уравнение типа Фоккера-Планка. Кинетическое уравнение для захваченных ионов решалось совместно с уравнениями Эйлера, записанными для суммы всех заряженных компонент, и

кинетическим уравнением для межзвездных атомов водорода. Использование уравнений Эйлера для суммы заряженных компонент обосновывается тем, что все компоненты (солнечные протоны и электроны и захваченные протоны) движутся с одной и той же скоростью, а функции распределения изотропны для всех компонент. Давление p в этом случае равно сумме парциальных давлений, а эффективное давление захваченных протонов определяется как интеграл от функции распределения. В работе Malama et al. (2006) было получено самосогласованное решение в частном случае, когда коэффициент диффузии по скоростям для захваченных ионов $D=0$, что соответствует спокойному солнечному ветру, когда уровень флуктуаций магнитного поля мал.

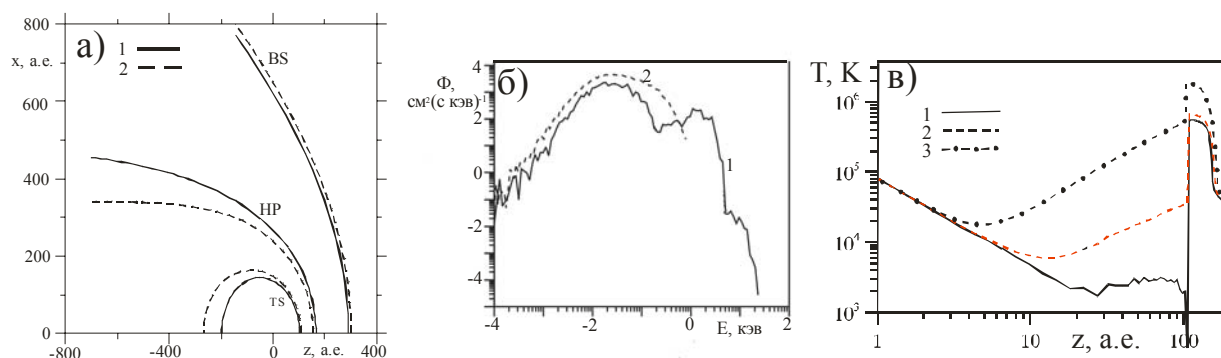


Рис. 6 а) Положения гелиопаузы и ударных волн в рамках модели с учетом неравновесности плазменной компоненты (линии 1) и в рамках модели Баранова-Маламы (линии 2); б) Поток атомов H сорта 2 на 1 а.е. (кривая 1), которые будут измеряться на космическом аппарате IBEX (запуск в 2008г.). Для сравнения линией 1 показаны потоки в рамках модели Баранова-Маламы. По оси ординат - логарифмический масштаб. в) Температура протонов в солнечном ветре как функция гелиоцентрического расстояния: кривая 1 соответствует модели многокомпонентной модели с учетом неравновесности, кривая 2 рассчитана для случая, когда 5 % тепловой энергии передается от захваченных ионов к протонной компоненте, а кривая 3 соответствует результатам модели Баранова-Маламы. По оси ординат – логарифмический масштаб.

Термодинамическая неравновесность захваченных и солнечных протонов приводит к уменьшению толщины области внутреннего ударного слоя (рис. 6а), что объясняется уменьшением суммарного давления заряженной компоненты в этой области. В направлении к набегающему потоку гелиосферная ударная волна (TS) удаляется от Солнца на 5 а.е., а гелиопауза (HP) приближается на 12 а.е. по сравнению с расчетами по модели Баранова-Маламы. В хвостовой области гелиоцентрическое расстояние до TS увеличивается на 70 а.е. Уточнение физических свойств внутреннего ударного слоя (между TS и HP) в связи с рассматриваемой неравновесностью имеет важное значение для планирования экспериментов по измерению потоков энергичных H-атомов из этой области (атомы H сорта 2) с 1 а.е. на спутнике IBEX. На рис 6б) приведены

результаты расчетов этих потоков на 1 а.е. Модель с учетом неравновесности предсказывает меньшие по сравнению с моделью Баранова-Маламы потоки для частиц с энергией < 1 кэВ и большие потоки частиц с энергиями > 1 кэВ. Частицы с энергиями 1 кэВ и выше образуются преимущественно при перезарядке межзвездных атомов водорода на захваченных протонах. Частицы же с более низкими энергиями образуются при перезарядке на солнечных протонах.

Сильное увеличение температуры на больших гелиоцентрических расстояниях согласно модели Баранова-Маламы (кривая 1 на рис. 6в) связано с допущением о мгновенной релаксации захваченных протонов в солнечном ветре. Измерения температуры солнечных протонов на космическом аппарате Voyager 2 показывают, что такой значительный нагрев солнечного ветра не осуществляется. Температура солнечных протонов, полученная в рамках неравновесной модели (кривая 3 на рис. 6в), уменьшается адиабатически вплоть до расстояния ~ 20 а.е., после которого температура спадает медленнее, чем по адиабатическому закону, а на расстояниях более 30 а.е. начинает медленно расти. Такое поведение температуры солнечного ветра связано с энергией электронов, которые рождаются в процессе фотоионизации (в модели предполагается, что $T_e = T_p$). Температура, полученная по модели, оказывается меньше измеряемой температуры солнечного ветра на аппарате Voyager 2. Это означает, что энергия, которая поступает в солнечный ветер, больше энергии фотоэлектронов. В связи с этим был проведен расчет, в котором предполагалось, что происходит независимый от гелиоцентрического расстояния обмен тепловой энергией ($\sim 5\%$) между частицами солнечного ветра и захваченными протонами, температура которых намного выше температуры солнечных протонов. Полученное в результате такого расчета распределение температуры (кривая 2 на рис. 6в) хорошо совпадает с измерениями на Voyager 2.

В **главе 8** исследуется влияние аномальной и галактической компонент космических лучей на область гелиосферного интерфейса (Измоденов, 1997; Myasnikov et al., 2000a, 2000b, Alexashov et al. 2004).

Для галактической компоненты космических лучей (ГКЛ) исследование проводилось в рамках двухкомпонентной (плазма и ГКЛ) и трехкомпонентной (плазма, H-атомы, ГКЛ) моделей. В случае двухкомпонентной модели (Myasnikov et al., 2000a) было обнаружено, что космические лучи приводят к сильной модификации формы и структуры гелиосферной и внешней ударных волн, а также приводят к существенному изменению гелиоцентрических расстояний до гелиопаузы и внешней ударной волны. Однако в случае более реалистичной трехкомпонентной модели (Myasnikov et al., 2000b) влияние ГКЛ на течение заряженной компоненты пренебрежимо мало по сравнению с

влиянием межзвездных H-атомов. Исключение составляет область в окрестности внешней ударной волны, где влияние ГКЛ может быть существенным.

Влияние АКЛ изучалось в работе Alexashov et al. (2004). Показано, что влияние АКЛ на течение солнечного ветра в окрестности гелиосферной ударной волны приводит к плавному торможению солнечного ветра в так называемом "предвестнике", за которым следует скачок. При этом скачок уменьшается по интенсивности и смещается на большее гелиоцентрическое расстояние по сравнению с расчетами, в которых влияние АКЛ не учитывалось (то есть с расчетами в рамках модели Баранова-Маламы). Интенсивность скачка, также как и степень его смещения зависят от величины коэффициента пространственной диффузии. Уменьшение интенсивности скачка приводит к уменьшению температуры в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой, что важно для интерпретации измерений атомов H сорта 2. Наибольшее смещение скачка (около 4 а.е.) достигается для средних значений коэффициента диффузии. Предвестник гелиосферной ударной волны наиболее явно выражен для малых значений коэффициента диффузии и исчезает при больших. Это объясняется тем, что в первом случае характерный диффузионный масштаб много меньше расстояния до TS. При этом давление космических лучей в области за этой ударной волной сравнимо с тепловым давлением плазмы.

В **главе 9** исследуется вопрос о проникновении межзвездных атомов кислорода и азота через область гелиосферного интерфейса (Izmodenov et al., 1997, 1999b, 2004; Izmodenov 2007). Актуальность этого исследования обуславливается необходимостью интерпретировать измерения захваченных ионов этих элементов на космическом аппарате Ulysses и позволяет получить независимые от астрономических наблюдений сведения о космическом содержании различных элементов в локальной межзвездной среде.

Приводится математическая постановка задачи, а также анализируются полученные распределения атомов и ионов. Показано, что в области между гелиопаузой и внешней ударной волной образуется кислородная стенка (аналогично водородной стенке в модели Баранова-Маламы).

В работе Izmodenov et al. (2004) был проведен сравнительный анализ проникновения межзвездных атомов водорода, кислорода и азота через гелиосферный интерфейс внутрь гелиосферы. Показано, что сквозь гелиопаузу в солнечную систему проникает 81 ± 2 % и 89 ± 1 % межзвездного кислорода и азота соответственно, что с учетом данных, полученных на КА Ulysses, дает возможность определить концентрации атомов кислорода и азота в локальной межзвездной среде:

$$n_{O,\infty} = (7.8 \pm 1.3) 10^{-5} \text{ см}^{-3} \text{ и } n_{N,\infty} = (1.1 \pm 0.2) 10^{-5} \text{ см}^{-3}.$$

Далее в главе вычисляются относительные космические содержания кислорода и азота, которые сравниваются с данными, полученными из анализа спектров поглощения.

В **главе 10** приводятся примеры применения моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой для интерпретации данных, полученных с различных космических аппаратов.

В первой части главы 10 (*n.10.1*) проводится *анализ спектров поглощения в линии Лайман-альфа полученных на Hubble Space Telescope*. Принципиальная схема измерений спектров поглощения показана на рис.7. Перед тем как попасть в объектив телескопа (точка 2 на рис 7а) излучение звезды (кривые 1 на рис 7б,в) проходит через среду вдоль луча зрения (линия 3 на рис.7а), где часть его поглощается. Основная часть такого поглощения происходит в межзвездном газе. Однако правое крыло получаемых прибором спектров можно объяснить только при помощи поглощения в области гелиосферного интерфейса.

Linsky & Wood (1996) показали, что поглощение в правом крыле спектра в направлении звезды Альфа-Центавра может быть объяснено с помощью водородной стенки из вторичных межзвездных атомов (рис. 7а), которая была предсказана в работе Baranov et al. (1991).

В работе Izmodenov et al. (1999с) был проанализирован спектр поглощения, полученный прибором GHRS на HST в направлении на звезду *Sirius* (рис. 7в), луч зрения на которую составляет угол $\theta = 139^{\circ}$. Объяснить полученный спектр оказалось возможным только с привлечением поглощения на атомах сорта 2, которые образуются в области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой и имеют большие скорости хаотического движения. Левое крыло спектров поглощения (рис.7) можно объяснить наличием поглощения в водородных стенках у наблюдаемых звезд (см., например, Izmodenov et al., 1999с), что, в свою очередь, свидетельствует о наличии у них звездных ветров.

Далее в диссертации детально излагаются результаты более поздних исследований (Izmodenov et al., 2002; Wood et al., 2007а, 2007б) по анализу спектров поглощения в направлении 28 звезд с использованием различных моделей гелиосферного интерфейса. Так в работе Izmodenov et al. (2002) исследовалось влияние степени ионизации ЛМС на поглощение в гелиосферном интерфейсе. В работе Wood et al. (2007а) спектры анализируются на основе трехмерной модели с учетом межзвездного магнитного поля. Исследуется влияние направления и величины межзвездного магнитного поля. В работе Wood et al. (2007б) спектры анализируются в рамках многокомпонентной модели с учетом неравновесности гелиосферной плазмы (Malama et al., 2006).

Во второй части главы 10 (*n.10.2*) приводятся результаты анализа экспериментов по рассеянному солнечному излучению на космических

аппаратах SOHO, Voyager и Pioneer (Quemerais & Izmodenov, 2002; Quemerais et al., 2003; Gangopadhyay et al., 2002, 2004, 2005 2006; Judge et al., 2005). Для анализа использовались результаты расчетов в рамках модели Баранова-Маламы с учетом ионов гелия и альфа частиц солнечного ветра. Показано, что для анализа рассеянного Лайман-альфа излучения существенным является учет двух сортов межзвездных атомов (сорта 3 и 4).

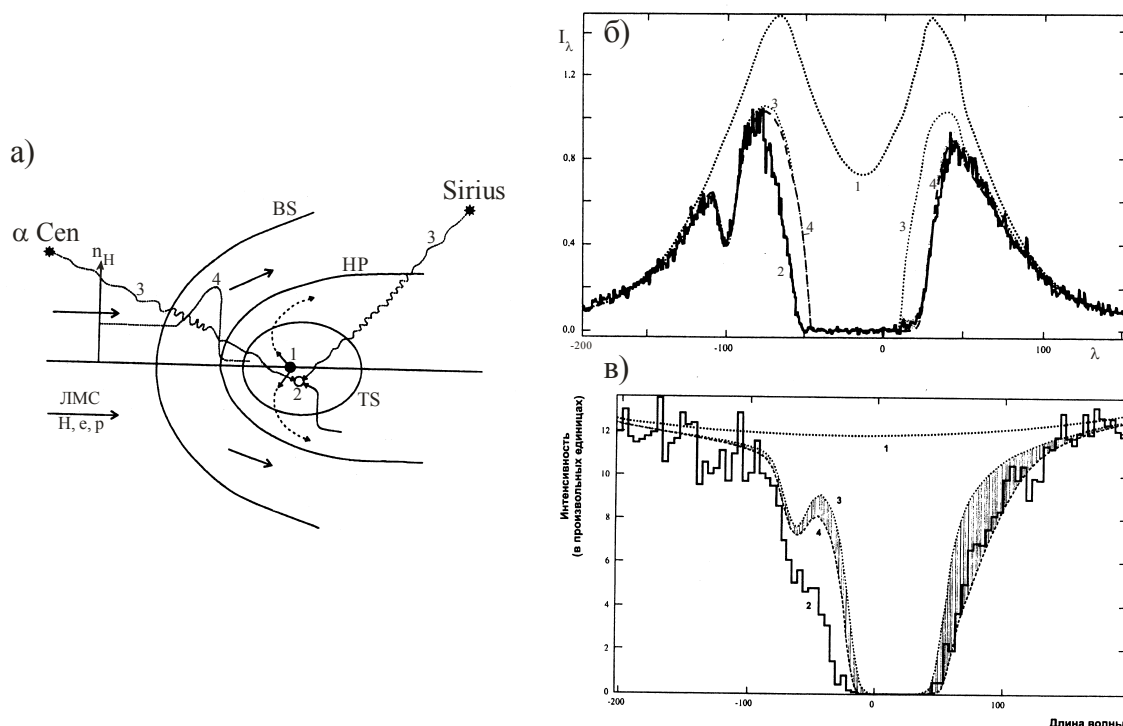


Рис. 7 а) Принципиальная схема эксперимента по поглощению излучения в Лайман-альфа от ближайших звезд. Здесь 1 – Солнце, 2 – прибор, принимающий излучение от звезды, 3 – направление вдоль луча зрения от соответствующей звезды, 4 – водородная стенка (немонотонное распределение межзвездных атомов H), ЛМС – поток локальной межзвездной среды; б) Спектр поглощения в линии Лайман-альфа от звезды Альфа-Центавра; в) спектр поглощения в линии Лайман-альфа от звезды Сириус. 1 – спектр излучения звезды, 2- спектр поглощения, полученный прибором на Hubble Space Telescope, 3 - спектр после поглощения атомами водорода в локальной межзвездной среде, 4 – спектр, полученный с учетом поглощения в «водородной стенке».

Далее в главе 10 (*n.10.3*) на основе моделей гелиосферного интерфейса анализируется факт пересечения гелиосферной ударной волны космическим аппаратом Voyager -1 на расстоянии 94 а.е.

В заключении главы 10 (*n.10.4*) проводится анализ спектров энергичных атомов гелиосферного происхождения (0.1-10 кэВ), полученных на основе модели Баранова-Маламы (Izmodenov et al, 2001b), а

также на основе модели с учетом неравновесности плазменной компоненты солнечного ветра (Malama et al. 2006).

В заклучении к диссертации изложены основные результаты и выводы.

В работе было проведено детальное исследование физических процессов на границе гелиосферы. Для этого автором были разработаны новые кинетико-газодинамические модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, которые учитывают влияние всех основных компонент межзвездной среды и солнечного ветра. В работе проведено исследование влияния таких компонент солнечного ветра как протоны, электроны, захваченные ионы, альфа частицы, аномальная компонента космических лучей, а также таких компонент межзвездной среды как межзвездные атомы водорода, протоны, межзвездное магнитное поле, галактические космические лучи. Исследовалось также влияние 11-летнего цикла солнечной активности. Результаты многокомпонентного моделирования использовались для анализа существующих и предсказания будущих данных космических аппаратов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Рассчитана функция распределения атомов водорода и исследована её эволюция в области гелиосферного интерфейса и внутри гелиосферы. Показано, что во всей области гелиосферного интерфейса и внутри гелиосферы функция распределения атомов водорода не является максвелловской. Исследованы кинетические эффекты, связанные с прохождением атомов водорода через область интерфейса.

2. Построена трехмерная кинетико-континуальная модель гелиосферного интерфейса, которая учитывает влияние межзвездного магнитного поля. Показана существенная асимметрия в распределении плазмы и атомов водорода, а также в положении ударных волн и гелиопаузы. Показано, что учет в модели межзвездного магнитного поля приводит к отклонению (в области гелиосферного интерфейса) направления движения атомов водорода от направления движения межзвездной среды. Такое отклонение движения атомов водорода было недавно обнаружено при анализе измерений рассеянного лайман-альфа излучения на КА SOHO (Lallement et al., 2005). Показано, что по степени отклонения можно определить величину и направление межзвездного магнитного поля в ЛМС, которые оставались до последнего времени неизвестными.

3. Показано, что изменение динамического давления солнечного ветра с 11-летним солнечным циклом приводит к колебаниям параметров плазмы и атомов водорода во всей области гелиосферного интерфейса. Амплитуда

колебаний гелиосферной ударной волны в лобовой части гелиосферы составляет ~10 %. Амплитуда колебаний растет по мере движения от лобовой части гелиосферы в хвостовую и достигает там 25 а.е. При этом колебания в лобовой и хвостовой частях находятся практически в противофазе. Амплитуда колебаний гелиопаузы и внешней ударной волны существенно меньше (~ 2 а.е. и < 0.7 а.е.). Движение гелиопаузы действует на межзвездную среду аналогично поршню, движущемуся в заполненной газом трубе, и приводит к образованию серии ударных волн и волн разрежения.

Во внешних областях солнечного ветра флуктуации плотности первичных и вторичных межзвездных Н-атомов сортов 2-4 находятся в пределах $\pm 5\%$ от их среднего значения. При приближении к Солнцу амплитуды флуктуаций растут. Флуктуации концентрации Н-атомов сорта 1 составляют $\pm 30\%$ от их средних значений.

4. Исследован характер движения гелиосферной ударной волны в рамках нестационарной модели с граничными условиями, взятыми на основе измерений параметров солнечного ветра на 1 а.е. Показано, что полученные в результате расчетов положение и характер движения гелиосферной ударной волны хорошо согласуются с данными КА Voyager 1.

5. Исследован неравновесный характер плазмы внутри гелиосферы. В качестве одного частного результата, полученного в рамках многокомпонентной модели, были рассчитаны спектры энергичных нейтральных атомов гелиосферного происхождения на орбите Земли. Эти спектры будут измерены на КА IBEX (Interstellar Boundary Explorer) в 2008 году.

6. Показано, что учет межзвездных ионов гелия и альфа частиц солнечного ветра приводит к уменьшению расстояния между ударными волнами и практически не влияет на распределение межзвездных атомов в области гелиосферного интерфейса.

7. Проведено детальное исследование структуры хвостовой части гелиосферного интерфейса на больших (до 50000 а. е.) гелиоцентрических расстояниях. Основная цель этого исследования - поиск ответа на фундаментальный вопрос: до каких областей распространяется влияние солнечного ветра на окружающую его межзвездную среду? Показано, что из-за эффективного охлаждения плазменной компоненты вследствие перезарядки число Маха в солнечном ветре увеличивается, и на расстоянии ~4000 а. е. оно снова становится сверхзвуковым. В результате расчетов было получено, что на расстояниях ~40 - 50 тыс. а.е. параметры солнечного ветра практически неотличимы от параметров невозмущенной межзвездной среды. Такие расстояния можно считать границей гелиосферы в хвостовой области.

8. Показано, что галактические космические лучи меняют интенсивность и положение внешней ударной волны, но практически не влияют на распределение межзвездных атомов в гелиосферном интерфейсе, а также на распределение параметров плазмы внутри гелиосферы.

9. Показано, что аномальная компонента космических лучей влияет на течение плазмы солнечного ветра в окрестности гелиосферной ударной волны, а также влияет на величину скачка и на его положение.

10. Показано, что процесс перезарядки приводит к образованию кислородной стенки – увеличения плотности атомов вокруг гелиопаузы. Показано, что через гелиопаузу в солнечную систему проникает $81 \pm 2 \%$ и $89 \pm 1 \%$ межзвездного кислорода и азота соответственно, что совместно с данными КА Ulysses позволяет определить концентрации атомов кислорода и азота в локальной межзвездной среде: $n_{O,\infty} = (7.8 \pm 1.3) 10^{-5} \text{ см}^{-3}$ и $n_{N,\infty} = (1.1 \pm 0.2) 10^{-5} \text{ см}^{-3}$.

11. Результаты, полученные в рамках кинетико-газодинамических моделей гелиосферного интерфейса, были использованы при анализе данных с различных космических аппаратов. В частности, в диссертации удалось предсказать и объяснить следующие явления на границе гелиосферы:

- поглощение лайман-альфа излучения в области внутреннего ударного слоя между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой, которое наблюдается в направлении в хвост гелиосферы. Наблюдаемые на Hubble Space Telescope спектры поглощения в направлениях к 28 ближним звездам удалось объяснить с использованием моделей, разработанных в диссертации;

- существование водородных стенок и «астросфер» (аналогично, гелиосфере) вокруг других звезд было показано на примере спектра поглощения в направлении звезды Сириус. Открытие водородных стенок около других звезд дало начало новому способу исследования свойств и эволюции звездных ветров посредством анализа водородных стенок. Это, в свою очередь, позволяет исследовать вопрос об эволюции солнечного ветра и дать существенно новую информацию об эволюции солнечной системы;

- фильтрацию межзвездных атомов водорода, кислорода и азота через область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой (КА Ulysses);

- эффективный нагрев, торможение и отклонение направления движения межзвездных атомов водорода в области взаимодействия межзвездной среды с локальной межзвездной средой, которые наблюдаются в экспериментах по рассеянному Лайман-альфа излучению на КА SOHO, Pioneer 10, Voyager 1 и 2.

12. Вычислены потоки энергичных (~1 кэВ) атомов водорода на орбите Земли. Эти результаты были использованы при планировании космического аппарата Interstellar Boundary Explorer (IBEX). Запуск КА IBEX запланирован на 2008 г.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА³

1. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР. - 1970. - Т.194. № 1. С.41- 44.
2. Баранов В.Б., Лебедев М.Г., Рудерман М.С. Структура области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой и ее влияние на проникновение атомов H в солнечную систему // Astrophys. Space Sci. - 1979. - V. 66. № 2. P. 429 – 440.
3. Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д., Рыбчинский Р.Е. Изучение межпланетного ионизованного газа, энергичных электронов и корпускулярного излучения Солнца при помощи трех-электродных ловушек заряженных частиц на второй советской космической ракете // Докл.АН СССР. - 1960. - Т. 131. № 6. С. 1301 - 1304.
4. Baranov V. B., Lebedev M., Malama Y. The influence of the interface between the heliosphere and the local interstellar medium on the penetration of the H atoms to the solar system // Astrophys. J. – 1991.- V.375. P.347-351.
5. Baranov V.B., Malama Yu.G. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: numerical solution of self-consistent problem // J. Geophys. Res. - 1993. - V. 98. № A9. P. 15157 – 15163.
6. Baranov V.B., Malama Yu.G. Axisymmetric Self-Consistent Model of the Solar Wind Interaction with the LISM: Basic Results and Possible Ways of Development // Space Science Reviews – 1996. – V.78. Issue ½. P.305-316.
7. Bertaux J.L., Blamont J. Evidence for a source of an extraterrestrial hydrogen Lyman- α emission: The interstellar wind // Astron. Astrophys. - 1971.- V.11. № 2. P. 200 – 217.
8. Blum P. W., Fahr H. J., Interaction between Interstellar Hydrogen and the Solar Wind // Astron. Astrophys. – 1970. - V.4. P.280-290.
9. Fahr H., Kausch T., Scherer H. A 5-fluid hydrodynamic approach to model the solar system-interstellar medium interaction // Astron. Astrophys. – 2000.- 357, 268-282.
10. Lallement R. Relations Between ISM Inside and Outside the Heliosphere // Space Sci. Rev. – 1996. – V.78. P.361-374,.

³ Цитируемая литература, не вошедшая в список публикаций по теме диссертации.

11. *Lallement R., Quémerais E., Bertaux J. L., Ferron S., Koutroumpa D., Pellinen R.* Deflection of the Interstellar Neutral Hydrogen Flow across the Heliospheric Interface // *Science*. - 2005. - V. 307. № 5714. P. 1447-1449.
12. *Linsky J., Wood B.* The alpha Centauri Line of Sight: D/H Ratio, Physical Properties of Local Interstellar Gas, and Measurement of Heated Hydrogen (The 'Hydrogen Wall') Near the Heliopause // *Astrophys. J.* – 1996.- V.463, P.254- 270.
13. *Malama Y.G.*, Monte-Carlo simulation of neutral atoms trajectories in the solar system // *Astrophys. Space Science* – 1991. – V.176. № 1. P.21-46.
14. *Parker E.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.* - 1958. - V.128. № 3. P.664 – 676.
15. *Parker E.* The stellar wind regions // *Astrophys. J.* - 1961.- V.134. № 1. P. 20–27.
16. *Thomas G., Krassa R.* OGO-5 measurements of the Lyman- α sky background // *Astron. Astrophys.* - 1971. - V.11. № 2. P. 218 – 233.
17. *Witte M.*, Kinetic parameters of interstellar neutral helium. Review of results obtained during one solar cycle with the Ulysses/GAS-instrument // *Astron. Astrophys.* – 2004. - V.426, P.835-844.
18. *Zank G.P., Pauls H.L., Williams L.L., Hall D.T.* Interaction of the solar wind with the local interstellar medium: a multifluid approach // *J. Geophys. Res.* - 1996. - V. 101. № A10. P. 21, 639 – 21, 655.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1] *Измоленов В.В.* Проникновение галактических космических лучей через область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной среды // *Письма в Астрон. Ж.* – 1997. – Т. 23. №4. С.253-261.
- [2] *Izmodenov V.* Penetration of the galactic cosmic rays into the heliosphere through LISM- Solar Wind interface // *Adv. Space Res.* – 1997. – V. 19. P. 965-968.
- [3] *Izmodenov V., Malama Yu. G., Lallement, R.* Interstellar neutral oxygen in a two-shock heliosphere // *Astronomy and Astrophysics* – 1997. – V.317. P.193-202.
- [4] *Baranov V.B., Izmodenov V.V., Malama Yu.G.* On distribution function of H-atoms in the problem of the Solar Wind interaction with the local interstellar medium (LISM) // *J. Geophys. Research* – 1998 - V.103, P.9575-9585.
- [5] *Izmodenov, V.V., Geiss J., Lallement R., Gloeckler G., Baranov V.B., Malama Y.G.* Filtration of interstellar hydrogen in the two-shock heliospheric interface: inferences on the LIC electron density // *J. Geophys. Res.* – 1999a - V.104, A3. P.4731-4741.
- [6] *Izmodenov, V.V., Lallement R., Geiss J.* Interstellar oxygen in the heliospheric interface: influence of electron impact ionization // *Astron. Astrophys.* – 1999b. - V.344. P.317- 321.

- [7] *Izmodenov V. V., Lallement R., Malama Y.G.* Heliospheric and astrospheric hydrogen absorption towards Sirius: no need for interstellar hot gas // *Astron. Astrophys.* - 1999c. – V.342. P.L13-L16.
- [8] *Izmodenov V.V.*, Physics and gas-dynamics of the heliospheric interface // *Astrophys. Space Sci.* – 2000 – V.274. Issue ½. P.55-69.
- [9] *Izmodenov, V.V., Malama Yu.G., Kalinin A. P., Gruntman M., Lallement R., Rodionova I.P.* Hot neutral H in the heliosphere: elastic H-H, H-p collisions // *Astrophys. Space Sci.* – 2000. - V.274. Issue ½. P.71-76.
- [10] *Myasnikov A.V., Alexashov D.B., Izmodenov V.V., Chalov S.V.* Self-consistent model of the solar wind interaction with three-component circumsolar interstellar cloud: Mutual influence of thermal plasma and galactic cosmic rays and H-atoms // *J. Geophys. Res.* – 2000a. – V.105. No. A3. P.5167-5168.
- [11] *Myasnikov A.V., Izmodenov V.V., Chalov S.V., Alexashov D. B.* Self-consistent model of the solar wind interaction with two component circumsolar interstellar cloud: Mutual influence of thermal plasma and galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* – 2000b. – V.105. No. A3. P.5179-5188.
- [12] *Izmodenov V.*, Velocity distribution of interstellar H atoms in the heliospheric interface // *Space Sci. Rev.* – 2001. - V.97(1/4) P.385-388.
- [13] *Izmodenov V.V., Gruntman M., Malama Y.G.* Interstellar Hydrogen Atom Distribution Function in the Outer Heliosphere // *J. Geophys. Res.* – 2001a. - V.106. No. A6. P.10681-10690.
- [14] *Izmodenov V., Gruntman M., Baranov V., Fahr H.* Heliospheric ENA fluxes: how sensitive are they to the ionization state of LIC? // *Space Sci. Rev.* – 2001b. - V.97 (1/4) P.413-416.
- [15] *Izmodenov, V., Wood B., Lallement R.* Hydrogen wall and heliosheath Lyman-alpha absorption toward nearby stars: possible constraints on the heliospheric interface plasma flow // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V.107(10), doi: 10.1029/2002JA009394.
- [16] *Quemerais E., Izmodenov V.* Effects of the heliospheric interface on the interplanetary Lyman-alpha glow at 1 AU from the Sun // *Astron. Astrophys.* – 2002. - V.396. P.269-281.
- [17] *Gangopadhyay P., Izmodenov V., Gruntman M., Judge D.* Interpretation of Pioneer 10 Lyman-alpha based on heliospheric interface models: methodology and first results // *J. Geophys. Res.* - 2002. – V.107(11). Doi: 10.1029/2002JA009345.
- [18] *Izmodenov, V.V., Malama Y.G., Gloeckler G., Geiss J.* Effects of interstellar and solar wind ionized helium on the interaction of the solar wind with the local interstellar medium // *Astrophys. J. Let.* – 2003a. - V.954. P.L59-L62.
- [19] *Измоденов В.В., Алексашов Д.Б.* Модель хвостовой области гелиосферного интерфейса // *Письма в Астрон. Ж.* – 2003. - Т.29, No.1, С.69-75.

- [20] *Izmodenov V., Gloeckler G., Malama Y.* When Voyager 1 and 2 will encounter the termination shock? // *Geophys. Res. Let.* – 2003b. – V.30. Issue 7. P.3-1. CiteID 1351. doi: 10.1029/2002GL016127.
- [21] *Quemerais E., Bertaux J.-L., Lallement R., Sandel B.R., Izmodenov V.* Voyager 1/UVS Lyman alpha glow data from 1993 to 2003: Hydrogen distribution in the upwind outer heliosphere // *J. Geophys. Res.* Vol. – 2003. - V.108, CiteID 8029, doi: 0.1029/2003JA009871.
- [22] *Izmodenov V., Malama Y. G.* Variations of interstellar H atom parameters in the outer heliosphere: solar cycle effects // *Adv. Space Res.* -2004. – V. 34. Issue 1. P.74-78.
- [23] *Izmodenov V., Malama Y., Gloeckler G., Geiss J.* Filtration of interstellar H, O, N atoms through the heliospheric interface: Inferences on local interstellar abundances of the elements // *Astron. Astrophys.* – 2004. - V.414. P. L29-L32.
- [24] *Gruntman M., Izmodenov V.* Mass transport in the heliosphere by energetic neutral atoms // *J. Geophys. Res.* – 2004. V.109. No. A12. A12108. doi:10.1029/2004JA010727.
- [25] *Izmodenov V.* The heliospheric interface: models and observations// in "The Sun and the Heliosphere as an Integrated System; Series: Astrophysics and Space Science Library, Vol. 317, Poletto, G. Suess, S. T. (Eds.) - 2004. – P.23-64.
- [26] *Alexashov D.B., Izmodenov V.V., Grzedzielski S.* Effects of charge exchange in the tail of the heliosphere // *Adv. in Space Res.* – 2004. – V.34. Issue 1. P.109-114.
- [27] *Alexashov D.B., Chalov S.V., Myasnikov A.V., Izmodenov V.V., Kallenbach R.* The dynamical role of anomalous cosmic rays in the outer heliosphere // *Astron. Astrophys.* – 2004. - V.420, P.729-736.
- [28] *Wood B. E., Mueller. H.-R., Zank G. P. Izmodenov V. V., Linsky J. L.* The heliospheric hydrogen wall and astrospheres // *Adv. Space Res.* -2004.- V. 34. Issue 1. P.66-73.
- [29] *Gangopadhyay P., Izmodenov V.V., Quemerais E., Gruntman M. A.* Interpretation of Pioneer 10 and Voyager 2 Lyman Alpha data: first results // *Adv. Space Res.* – 2004. - V.34. Issue 1. P.94-98.
- [30] *Moebius E., Bzowski M., Chalov S., Fahr H.-J., Gloeckler G., Izmodenov V., Kallenbach R., et al.* Synopsis of the interstellar He parameters from combined neutral gas, pickup ion and UV scattering observations and related consequences // *Astron. Astrophys.* – 2004. - V.426. P.897-907.
- [31] *Izmodenov V., Malama Yu. G., Ruderman M.* Solar cycle influence on the interaction of the solar wind with Local Interstellar Cloud // *Astron. Astrophys.* – 2005a. - V.429. P.1069-1080.
- [32] *Izmodenov V., Alexashov D., Myasnikov A.V.* Direction of the interstellar H atom inflow in the heliosphere: role of the interstellar magnetic field // *Astron. Astrophys.* – 2005b. - V.437. P.L35–L38.

- [33] Зеленый Л.М., Веригин М.И., Захаров А.В., Измоленов В. В., Скальский А.А., Гелиофера и взаимодействие планет земной группы с солнечным ветром // Успехи Физических наук – 2005. – Т.175. № 6 P.643-655.
- [34] Alexashov, D., Izmodenov V. Kinetic vs. Multi-fluid models of the heliospheric interface: a comparison // *Astron. Astrophys.* – 2005. - V.439. P.1171-1181. doi: 10.1051/0004-6361:20052821.
- [35] Gangopadhyay P., Izmodenov V. V., Shemansky D. E., Gruntman M., Judge D.L. Reappraisal of the Pioneer 10 and Voyager 2 Lyman-alpha intensity measurements // *Astrophys. J.* – 2005. - V.628. P.514–519.
- [36] Judge D.L., Izmodenov V.V., Gruntman M., Gangopadhyay G., Search for heliospheric time-dependence in Pioneer 10 heliospheric Lyman-alpha glow data // *Astrophys. Space Sci. Transactions (ASTRA)* – 2005. - V.1. P.29–34.
- [37] Gruntman M., Izmodenov V.V., Pizzo V., Imaging the global solar wind flow in EUV // *J. Geophys. Res.* – 2006.- V.111. Issue A4. CiteID A04216 doi: 10.1029/2005JA011530.
- [38] Malama Y.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V., Modeling of the heliospheric interface: multi-component nature of the heliospheric plasma // *Astron. Astrophys.* – 2006. - V.445. P.693-701.
- [39] Gangopadhyay P., Izmodenov V.V., Gruntman M., Judge D. L. Voyager 1, Voyager 2 and Pioneer 10 Lyman-alpha data and their interpretation // *Astrophys. J.* – 2006. – V.637. Issue 2. P.786-790.
- [40] Баранов В. Б., Измоленов В.В. Модельные представления о взаимодействии солнечного ветра со сверхзвуковым потоком межзвездной среды. Предсказание и интерпретация экспериментальных данных // *Известия РАН, Механика жидкости и газа* – 2006. - № 5. С.19-40.
- [41] Измоленов В., Граница гелиосферы // в Сборнике «Модель космоса» (под ред. М.И. Панасюка) – 2006.- "Модель Космоса" - коллективная монография, Ред. Панасюк М.И., Библион-Русская книга, Москва, 132 с.
- [42] Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Multi-component 3D modeling of the heliospheric interface: effects of interstellar magnetic field // *American Institute of Physics Conference Proceedings* – 2006. - V.858. P.14-19.
- [43] Wood, B.E., Izmodenov V.V., Linsky J.L., Aleksashov, D.B. Dependence of heliospheric Lyman-alpha absorption on the interstellar magnetic field // *Astrophys. J.* – 2007a. - V.659. Issue 2. P.1784-1791.
- [44] Wood B.E., Izmodenov V.V., Linsky J.L., Malama Y.G. Lyman-alpha Absorption from Heliosheath Neutrals // *Astrophys. J.* – 2007b. - V.657, Issue 1, P.609-617.
- [45] Izmodenov, V. V., Filtration of Interstellar Atoms through the Heliospheric Interface // *Space Sci. Rev.* -2007.- doi: 10.1007/s11214-007-9203-5.
- [46] Izmodenov V.V., Malama Yu.G., Ruderman M. Modeling of the outer heliosphere with the realistic solar cycle // *Adv. Space Res.* – 2007. - doi:10.1016/j.asr.2007.06.033, 2007.