

На правах рукописи



Проворникова Елена Александровна

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ЧАСТИЧНО-ИОНИЗОВАННОЙ  
ПЛАЗМЫ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ НА ГРАНИЦЕ  
ГЕЛИОСФЕРЫ И В МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЕ**

01.03.03 – Физика Солнца

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета ФГОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Измоденов Владислав Валерьевич

Официальные оппоненты: Бисикало Дмитрий Валерьевич,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН, заместитель директора  
Института астрономии РАН

Чашей Игорь Владимирович,  
доктор физико-математических наук,  
заместитель директора Пушинской  
Радиоастрономической обсерватории  
АКЦ ФИАН

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный университет»

Защита состоится 11 октября 2013 г. в 13 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 « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Буринская Т.М.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** В диссертации представлено теоретическое исследование нестационарных течений в областях взаимодействия плазмы с частично-ионизованным или нейтральным газом в космическом пространстве. Рассматриваются два явления: (1) взаимодействие солнечного ветра с локальной межзвездной средой (ЛМС); (2) взаимодействие холодного нейтрального межзвездного облака с горячей плазмой.

Интерес к моделированию области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС обусловлен необходимостью объяснения экспериментальных данных (с космических аппаратов (КА) Вояджер 1 и 2, IBEX, SOHO, Ulysses и других), которые свидетельствуют о многокомпонентном характере взаимодействия и сложной структуре течения в этой области. Также данное исследование является перспективным для понимания структуры взаимодействия ветров других звезд с межзвездным газом.

После пересечения гелиосферной ударной волны в 2004 и 2007 гг., соответственно, КА Вояджер 1 и 2 впервые приступили к прямым измерениям в гелиосферном ударном слое – области дозвукового течения сжатого и нагретого солнечного ветра на расстоянии  $\sim 100$  а.е. от Солнца. Данные измерений плотности, скорости и температуры плазмы, полученные на КА Вояджер 2 [1], дают основания полагать, что нестационарные эффекты в солнечном ветре, вызванные циклом солнечной активности, являются важным фактором, влияющим на течение в этой области. Множество существующих теоретических работ посвящено изучению области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС с учетом различных компонент и физических процессов в стационарном случае, которые определили современное представление о структуре этой области [2]. В последние годы с увеличением вычислительных мощностей компьютеров стало возможным создание нестационарных трехмерных моделей, которые учитывают временные изменения

параметров солнечного ветра. Развитие таких моделей крайне важно для анализа данных измерений КА Вояджер 1 и 2.

В данной работе в рамках трехмерной нестационарной магнитогидродинамической (МГД) модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС исследуется распространение разрывов в плазме солнечного ветра в гелиосферный ударный слой. Рассматриваемые разрывы возникают в солнечном ветре при ускоренных выбросах солнечной плазмы, наблюдаемых в период солнечного максимума, а также при распространении коротационных областей взаимодействия, характерных для солнечного минимума.

Актуальность исследования холодных межзвездных облаков, окруженных горячей плазмой, связана с необходимостью объяснения спектральных данных с космической рентгеновской обсерватории Chandra, рентгеновского телескопа XMM-Newton и спутника Suzaku. Наблюдаемые спектры мягкого рентгеновского излучения в диапазоне от 0.1 до 1 кэВ от различных астрофизических областей взаимодействия нейтрального газа с плазмой показывают характерные яркие линии излучения, которые невозможно объяснить тепловыми процессами генерации рентгеновского излучения в высокотемпературной плазме. После открытия рентгеновского излучения от комет вследствие перезарядки ионов солнечного ветра (например,  $C^{5+}$ ,  $N^{5+}$ ,  $O^{+6}$ ) и нейтральных атомов кометного газа была высказана гипотеза [7], что процесс перезарядки может быть важнейшим и возможно доминирующим механизмом рентгеновского излучения и в других астрофизических областях взаимодействия нейтрального газа и горячей плазмы. Объяснение спектральных особенностей межзвездных областей взаимодействия нейтрального газа и горячей плазмы требует создания корректных многокомпонентных теоретических моделей. Ключевым процессом взаимодействия нейтрального газа и плазмы является процесс перезарядки протонов плазмы и нейтральных атомов. Процесс играет важную роль в динамической структуре таких областей и является источником рентгеновского излучения, действуя между сильно заряженными

ионами плазмы и нейтральными атомами. В существующих до настоящего времени моделях течений межзвездного газа этот процесс не учитывался.

В диссертации автором предложена новая двухкомпонентная газодинамическая модель взаимодействия нейтральных межзвездных облаков с горячей плазмой, учитывающая процесс перезарядки. На основе модели сделана оценка интенсивности рентгеновского излучения вследствие перезарядки от узких переходных областей на границе холодных нейтральных межзвездных облаков, окруженных горячей плазмой. Создание новых космических рентгеновских телескопов с большим спектральным и угловым разрешением (КА «Спектр-РГ» с планируемым запуском в 2015) позволит обнаружить удаленные астрофизические источники рентгеновского излучения вследствие перезарядки (остатки сверхновых, области формирования звезд, высокоскоростные холодные облака, движущиеся в горячей среде), что делает данное направление исследований особенно актуальным.

**Целями** настоящей работы являются:

1. Исследование распространения сильных разрывов в плазме солнечного ветра в область взаимодействия солнечного ветра с ЛМС в рамках трехмерной МГД модели.
2. Объяснение наблюдаемого на Вояджере 2 эффекта ослабления ударных волн в области гелиосферного ударного слоя.
3. Построение двухкомпонентной газодинамической модели взаимодействия холодного нейтрального межзвездного облака с окружающей горячей плазмой с учетом процесса перезарядки.
4. Исследование влияния процесса перезарядки на газодинамическую структуру области взаимодействия холодного нейтрального газа и горячей плазмы.
5. Оценка интенсивности рентгеновского излучения вследствие перезарядки от локальных межзвездных облаков, окруженных горячей плазмой.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые в рамках трехмерной МГД модели исследовано распространение (в область взаимодействия солнечного ветра с ЛМС) возмущения солнечного

ветра, включающего в себя две ударные волны (переднюю и обратную). Проведен детальный анализ структуры течения плазмы в гелиосферном ударном слое при взаимодействии возмущения с гелиосферной ударной волной и гелиопаузой. Определены типы МГД сильных разрывов и волн, образующихся в ударном слое, и амплитуды изменения параметров плазмы на разрывах.

2. В рамках МГД модели впервые предложено объяснение ослабления интенсивности ударных волн коротационных областей взаимодействия в солнечном ветре при их распространении в область гелиосферного ударного слоя. Такое ослабление наблюдается на Вояджере 2 в период солнечного минимума. В результате взаимодействия ударных волн с волнами разрежения в сверхзвуковом солнечном ветре скачки параметров на ударных волнах существенно уменьшаются.
3. Разработана новая двухкомпонентная газодинамическая модель взаимодействия холодных нейтральных межзвездных облаков с окружающей горячей плазмой с учетом процесса перезарядки.
4. Выявлено, что процесс перезарядки может быть одним из механизмов, обеспечивающих существование межзвездных облаков в горячей плазме.
5. Обнаружено, что интенсивность рентгеновского излучения вследствие перезарядки от сравнительно узких переходных областей на границе холодных межзвездных облаков сравнима с интенсивностью рентгеновского излучения от крупномасштабных областей, заполненных горячей плазмой.

**Практическая ценность** работы заключается в применении разработанных численных физико-математических моделей к анализу экспериментальных данных с КА Вояджер 1 и 2, IBEX, рентгеновских телескопов Chandra, XMM-Newton и Suzaku. Методы и подходы, используемые для описания течения плазмы солнечного ветра в гелиосфере и на ее границах, могут быть использованы при исследовании астросфер других звезд. Двухкомпонентная модель взаимодействия холодного нейтрального газа и горячей плазмы может быть применена для

исследования целого ряда астрофизических явлений, таких как: а) галактический ветер, взаимодействующий с холодным плотным облаком гало; б) высокоскоростное холодное нейтральное облако, движущееся в горячем ионизованном газе гало; в) плотные нейтральные облака, захваченные горячим газом остатков сверхновой.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена тем, что:

- для описания исследуемых явлений в работе использованы классические уравнения газовой динамики и магнитной гидродинамики;
- в разработанных программах для численного решения этих уравнений использованы метод Годунова решения задачи о распаде произвольного разрыва и метод HLLE (Harten-Lax-van Leer-Einfeldt), основанный на приближенном линейном распаде в случае МГД. Используемые разностные схемы аппроксимируют дифференциальные уравнения, являются устойчивыми и, следовательно, обеспечивают сходимость численного решения;
- используемые программы протестированы на примерах классических задач, имеющих аналитические решения;
- результаты исследований, представленных в работе для некоторых частных случаев, согласуются с результатами исследований, опубликованных ранее в научной литературе.

**Апробация работы.** Основные результаты докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах по аэромеханике и газовой динамике под руководством академика РАН Черного Г.Г. (МГУ им. М.В. Ломоносова), семинарах Института космических исследований (ИКИ) РАН, семинарах лаборатории физической газовой динамики под руководством профессора В.Б. Баранова (Институт проблем механики РАН), на V, VI, VII конференциях молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2009, 2010, 2011); XVI, XVII Международных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2009, 2010); конференции

Ломоносовские чтения (МГУ, Москва, 19-23 апреля 2010); 5-й, 7-й, 8-й конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2010, 2012, 2013); Всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (ИПМех РАН, Москва, 2-3 декабря 2008); Всероссийской астрофизической конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (ИКИ РАН, Москва, 24-26 декабря 2008); конференции Американского геофизического общества (AGU) (г. Сан-Франциско, США, 2010, 2011, 2012); конференции Европейского геофизического общества (EGU) (г. Вена, Австрия, 2010, 2011, 2012); 39-ой научной ассамблеи COSPAR (Майсур, Индия, 14-22 июля 2012); конференции «Solar, heliospheric and interplanetary environment» (США, 2010, 2011, 2012); конференции «Suzaku-2011» (Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, Калифорния, США, 20-22 июля 2011); международной конференции «The Local Bubble and beyond II» (г. Филадельфия, США, 21-24 апреля 2008); 12-й международной конференции «Solar Wind - 12» (г. Сан-Мало, Франция, 2009).

**Публикации и личный вклад автора.** Результаты диссертации опубликованы в 7 работах [1-7], включая 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах из списка ВАК по специальности работы [1-4], одну статью в рецензируемом сборнике «Актуальные проблемы механики» [5] и 2 статьи в рецензируемых сборниках статей всероссийских и международных конференций [6,7]. Автор внес основной вклад во все исследования, изложенные в диссертации и публикациях. Автором осуществлялись: математические постановки всех задач, рассматриваемых в диссертации; написание и тестирование программы для решения систем уравнений Эйлера с источниковыми членами для нейтрального газа и плазмы на подвижных адаптивных сетках; проведение всех численных расчетов; анализ результатов, полученных в рамках численных моделей, и их качественное сравнение с экспериментальными данными; подготовка текстов публикаций; подготовка ответов на рецензии в процессе публикации работ.

**Объем и структура диссертации.** Общий объем диссертации, состоящей из введения, трех глав, заключения и списка литературы – 128 страниц, включая 28 иллюстраций. Список литературы содержит 111 библиографических ссылок.

**Краткое содержание диссертации.** Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы, дано краткое изложение структуры диссертации, обоснована научная новизна результатов, их достоверность и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 формулируется трехмерная МГД модель взаимодействия солнечного ветра с набегающим потоком частично-ионизованной ЛМС, описан численный метод решения задачи и представлено полученное решение, описывающее структуру течения в области взаимодействия в стационарном случае.

В разделе 1.1 дан обзор существующих моделей, описывающих взаимодействие солнечного ветра с ЛМС в стационарном случае, которые учитывают влияние межзвездных атомов водорода, межзвездного магнитного поля, неравновесный характер плазмы солнечного ветра и других компонент. Приведены параметры скорости, концентрации частиц и температуры плазмы солнечного ветра и межзвездного газа, полученные на основе прямых измерений или оценок по экспериментальным данным. Подробно описаны результаты первой самосогласованной кинетико-газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС [3], демонстрирующие влияние процесса перезарядки на структуру этой области и параметры течения солнечного ветра. Приведено обсуждение корректных методов и их приближений для описания различных компонент взаимодействия, в частности, межзвездных атомов водорода, которые существенно влияют на течение плазмы в области гелиосферного ударного слоя.

В разделе 1.2 приведена математическая постановка задачи о взаимодействии двух течений: сферически-симметричного стационарного сверхзвукового потока полностью ионизованной плазмы солнечного ветра и набегающего сверхзвукового потока частично-ионизованного газа ЛМС. Взаимодействие двух потоков рассматривается в двухкомпонентном приближении. Ключевым процессом

взаимодействия заряженной и нейтральной компонент является *процесс перезарядки* – процесс передачи электрона от атома водорода к протону с образованием нового атома водорода и свободного протона:

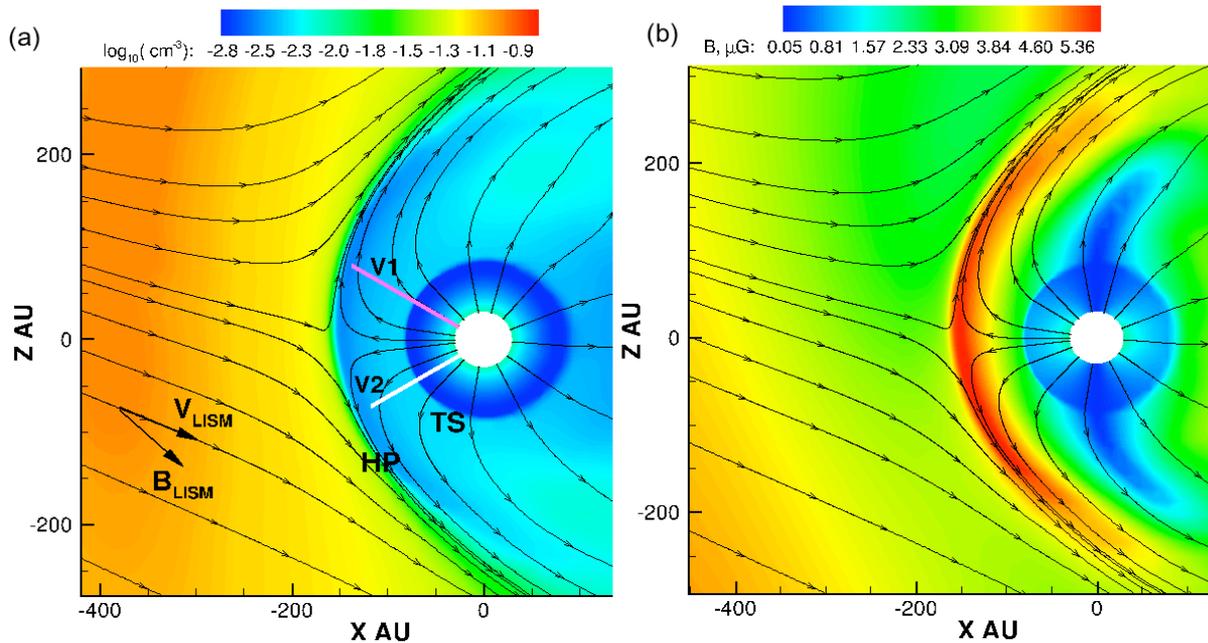


Процессами фотоионизации и ионизации электронным ударом в модели пренебрегается, поскольку на рассматриваемых расстояниях от Солнца ( $r > 30$  а.е.) роль этих процессов мала по сравнению с перезарядкой. Течение плазмы солнечного ветра и ЛМС в присутствии магнитных полей описывается системой уравнений идеальной МГД с источниковыми членами в уравнениях сохранения импульса и энергии вследствие взаимодействия с нейтральным газом в процессе перезарядки. Аналитические выражения для этих членов были получены в работе [4] на основе интеграла в форме Больцмана в предположении, что функции распределения по скоростям нейтральных атомов и плазмы являются локально максвелловскими. Для описания нейтральных атомов водорода применяется многожидкостное приближение, при котором предполагается, что функция распределения по скоростям нейтральных атомов водорода является суммой локально максвелловских функций по сортам атомов водорода:  $f_H = f_{H1} + f_{H2} + f_{H3} + f_{H4}$ . Атомы водорода разделяются на 4 сорта в зависимости от места их рождения при перезарядке в области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. Строго говоря, такое приближение не является корректным, поскольку длины свободного пробега межзвездных атомов водорода сравнимы с характерным размером задачи (расстоянием до гелиопаузы), и для их описания необходимо применять кинетический подход [3]. Многожидкостной подход дает ошибку 5% для распределений параметров плазмы по сравнению с кинетической моделью [5], но при этом существенно упрощает численное решение нестационарной задачи в главе 2. Для каждого сорта атомов водорода решается система газодинамических уравнений Эйлера с соответствующими источниковыми членами вследствие перезарядки с протонами плазмы. Для параметров плазмы

солнечного ветра граничные условия задаются на 30 а.е. от Солнца, для ЛМС (плазмы и нейтрального газа) – на бесконечности.

В **разделе 1.3** изложен метод численного решения сформулированной задачи. Системы МГД и газодинамических уравнений решаются самосогласованно с использованием аппроксимирующей разностной схемы HLLE (Harten-Lax-van Leer-Einfeldt; улучшенная схема Po) второго порядка точности с применением процедуры ограничения возрастания вариаций с помощью монотонного центрального ограничителя. В расчетах применяется адаптивная пространственная сетка с блочной структурой. Области с наилучшим пространственным разрешением выбираются из физических соображений и задаются при инициализации расчета. В частности, для расчета нестационарных течений солнечного ветра в главе 2 и сравнения результатов модели с экспериментальными данными применяется сетка с наилучшим разрешением вдоль траектории Вояджера 2 с размером ячеек  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.25$  а.е.

В **разделе 1.4** представлены результаты численного решения задачи о взаимодействии солнечного ветра с ЛМС. На рис.1 изображено распределение концентрации плазмы и величины магнитного поля в меридиональной плоскости. В результате взаимодействия двух потоков возникает структура течения, состоящая из гелиопаузы (HP) – тангенциального разрыва, разделяющего плазму солнечного ветра и межзвездной среды, гелиосферной ударной волны (TS), на которой сверхзвуковой солнечный ветер тормозится до дозвуковых скоростей, а также слабой головной ударной волны (BS) в потоке ЛМС на расстоянии  $r \sim 500$  а.е. от Солнца. Получены расстояния до поверхностей разрывов в направлениях движения КА Вояджер 1 и 2. Отличие в расстояниях до гелиосферной ударной волны по сравнению с измерениями составляет 10% и 4% для Вояджера 1 и 2 соответственно. Описан эффект асимметрии положений поверхностей разрыва вследствие влияния межзвездного магнитного поля [8].



**Рис. 1.** (a) Логарифм концентрации плазмы ( $cm^{-3}$ ) и (b) величина магнитного поля ( $\mu G$ ) в меридиональном сечении трехмерного решения с проекциями линий тока плазмы. TS – гелиосферная ударная волна, HP – гелиопауза, V1 и V2 – направления движения Вояджера 1 и 2.

Приводятся распределения параметров плазмы в сверхзвуковом солнечном ветре и гелиосферном ударном слое вдоль радиальных направлений, соответствующих траекториям Вояджера 1 и 2. Показано влияние процесса перезарядки между протонами плазмы и межзвездными атомами водорода на распределения параметров плазмы.

В **разделе 1.5** приведены основные выводы по результатам, полученным в первой главе: 1) сформулирована математическая постановка задачи о взаимодействии солнечного ветра с ЛМС в рамках многожидкостного приближения с учетом процесса перезарядки; 2) получено численное решение о структуре области гелиосферного ударного слоя; 3) описаны влияние процесса перезарядки на параметры плазмы солнечного ветра, а также эффект межзвездного магнитного поля на форму поверхностей разрыва в области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС.

В **главе 2** диссертации исследуется эволюция произвольных разрывов в сверхзвуковом солнечном ветре и в области гелиосферного ударного слоя. Рассматривается две задачи: 1) о распространении произвольного разрыва скорости

солнечного ветра и 2) об эволюции периодических скачкообразных изменений скорости солнечного ветра.

В разделе 2.1 дан обзор работ по экспериментальным наблюдениям и теоретическому моделированию нестационарных явлений в потоке солнечного ветра во внешней гелиосфере. Данные измерений параметров плазмы на КА Ulysses на 5 а.е. от Солнца и Вояджер 2 на 70 а.е. показывают несколько примеров распространения в солнечном ветре структур из двух ударных волн – передней и обратной. В системе координат, связанной с солнечным ветром, передняя ударная волна движется по направлению от Солнца, обратная – к Солнцу. Такая структура течения, как правило, образуется на фронте быстрых выбросов плазмы при солнечных вспышках в период максимума солнечной активности.

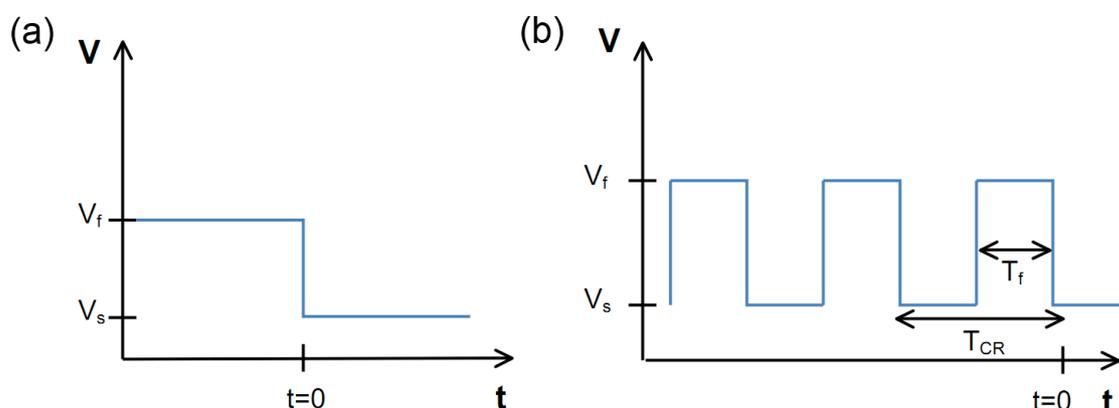
Также на КА Пионер 10 и Вояджер 2 в период уменьшения солнечной активности наблюдались периодические структуры в течении солнечного ветра, состоящие из передних и обратных ударных волн и волн разрежения, возникающих при распространении коротационных областей взаимодействия.

Наблюдаемые в сверхзвуковом солнечном ветре возмущения распространяются на большие расстояния от Солнца и влияют на течение в гелиосферном ударном слое. В работах [9], [10] исследовалось взаимодействие гелиосферной ударной волны с падающими под произвольным углом передней и обратной ударными волнами в рамках двумерной МГД модели. Параметры плазмы перед гелиосферной ударной волной были взяты из решения самосогласованной задачи о взаимодействии солнечного ветра с ЛМС [3]. Конфигурация течения после взаимодействия ударных волн определяется пятью безразмерными параметрами. В разделе приводятся решения задачи о структуре течения в ударном слое при взаимодействии гелиосферной ударной волны и падающей ударной волны, полученные в [9], [10].

В последующих разделах главы 2 проводится моделирование течения плазмы в гелиосферном ударном слое в двух случаях: при прохождении возмущения, включающего в себя две ударных волны (переднюю и обратную), и при

распространении серии возмущений, состоящих из нескольких ударных волн и волн разрежения.

В разделе 2.2 описаны граничные условия, используемые в трехмерной МГД модели из главы 1. Рассматриваются два типа граничных условий. На внутренней границе расчетной области в сверхзвуковом солнечном ветре (30 а.е. от Солнца) заданы произвольный разрыв радиальной скорости плазмы и периодические скачкообразные изменения скорости плазмы солнечного ветра (рис. 2). Величина

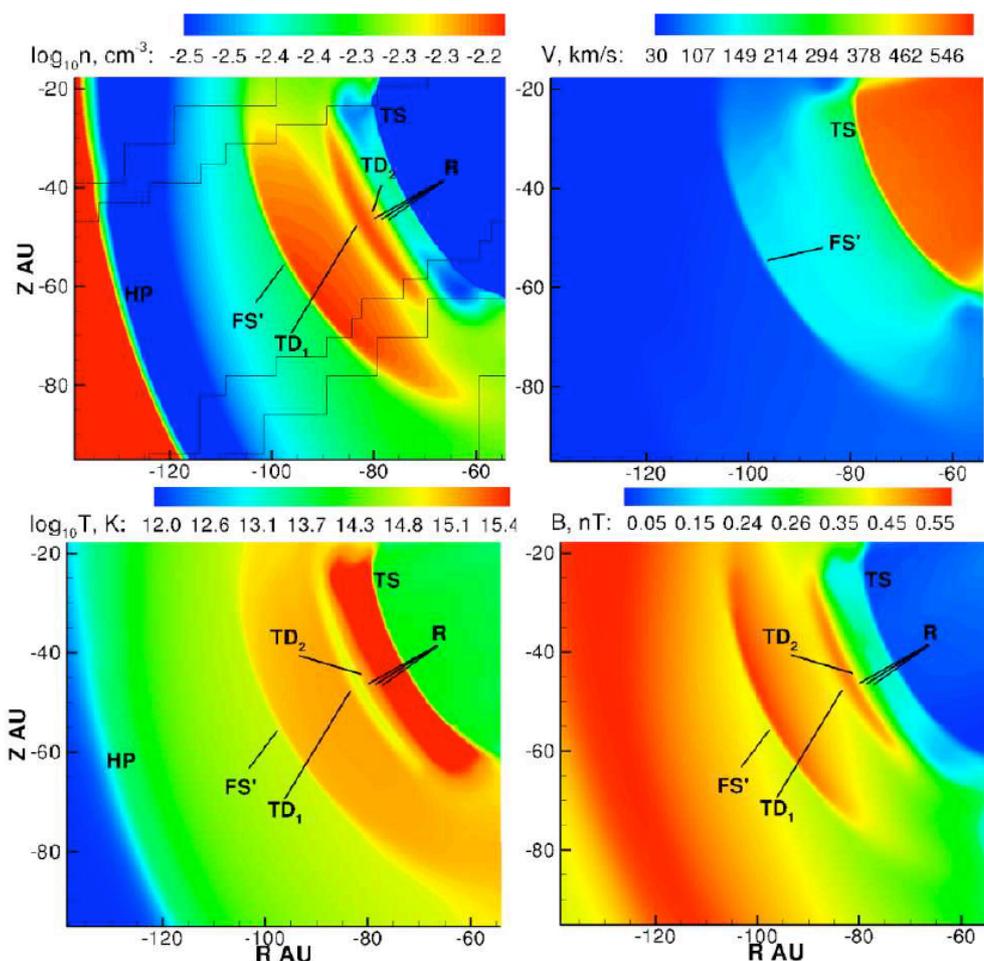


**Рис.2.** Два типа рассматриваемых граничных условий для скорости плазмы солнечного ветра на 30 а.е.: (а) Произвольный скачок скорости.  $V_s$  - скорость медленного потока,  $V_f$  - скорость быстрого потока. (б) Повторяющиеся скачкообразные возмущения скорости.  $T_f$  - длительность возмущения,  $T_{CR}$  - период между последовательными возрастаниями скорости.

скачка скорости на разрыве составляет  $V_f / V_s = 1.5$  (рис. 2 (а)). Амплитуда периодических возмущений скорости равна  $V_f / V_s = 1.4$  с периодом  $T = 27$  дней (рис. 2 (б)) соответствующим периоду вращения Солнца. Остальные параметры плазмы на внутренней границе остаются неизменными. Выбранные значения соответствуют наблюдаемым на Вояджере 2 скачкам параметров плазмы солнечного ветра. В качестве начальных условий в расчетах используется стационарное решение задачи о взаимодействии солнечного ветра с ЛМС, полученное в главе 1.

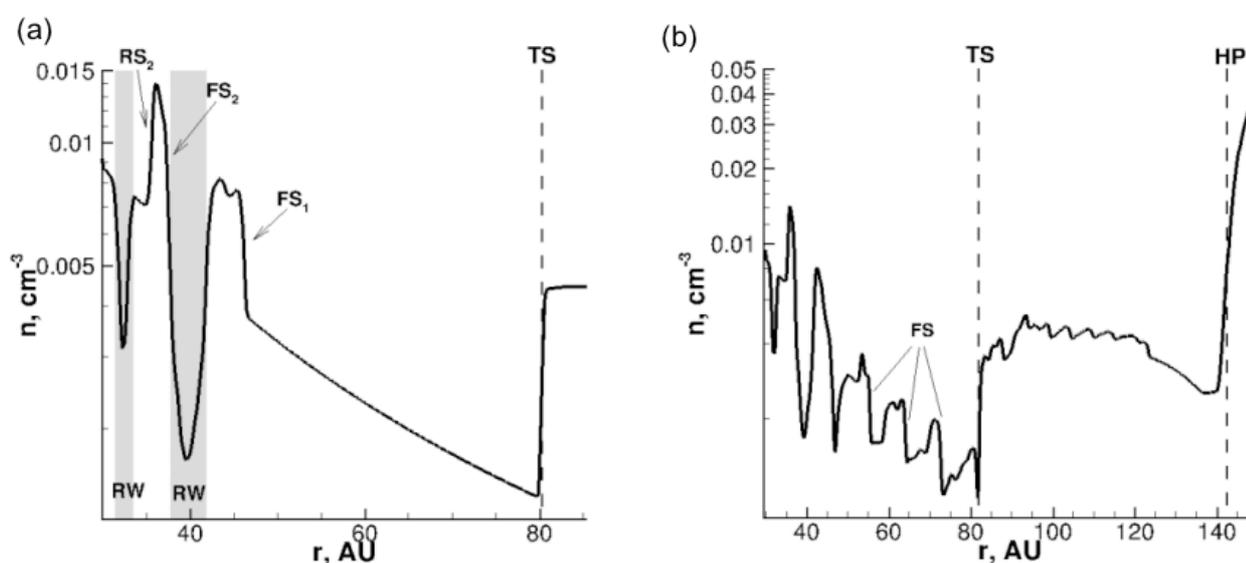
В разделе 2.3 представлены результаты численного решения задачи с граничными условиями первого типа. В результате распада произвольного разрыва (рис. 2 (а)) в потоке солнечного ветра возникает структура течения, состоящая из

двух ударных волн – передней и обратной – и контактной поверхности между ними. Анализ МГД течения плазмы солнечного ветра при распространении такого возмущения проводится поэтапно: 1) распространение в сверхзвуковом солнечном ветре; 2) взаимодействие с гелиосферной ударной волной; 3) распространение в гелиосферном ударном слое; 4) взаимодействие с гелиопаузой. Определены амплитуды возмущений параметров плазмы в области между ударными волнами, типы образующихся волн и сильных разрывов при прохождении пары ударных волн



**Рис. 3.** Распределения логарифма концентрации плазмы ( $cm^{-3}$ ), скорости ( $км/с$ ), логарифма температуры ( $K$ ) и величины магнитного поля ( $nT$ ) в плоскости V2-Oz в момент времени  $t = 1$  год после прохождения возмущения через гелиосферную ударную волну. Обозначения: FS' - передняя ударная волна, TD<sub>1</sub> и TD<sub>2</sub> -тангенциальные разрывы, TS - гелиосферная ударная волна, R - волна разрежения, HP – гелиопауза.

через гелиосферную ударную волну и величины изменения параметров плазмы на разрывах в гелиосферном ударном слое. На рис. 3 показаны распределения параметров плазмы и величины магнитного поля при распространении возмущения в гелиосферном ударном слое. На графиках обозначены образовавшиеся сильные разрывы и волны. В разделе также показано образование отраженных быстрых магнитозвуковых волн внутри гелиосферного ударного слоя при взаимодействии передней ударной волны (FS') и гелиопаузы (HP).



**Рис. 4.** (а) Зависимость концентрации плазмы ( $см^{-3}$ ) от расстояния от Солнца в направлении траектории Вояджера 2. Эффект ослабления обратной (RS) и передней (FS) ударных волн при взаимодействии с волной разрежения (область серого цвета) в сверхзвуковом солнечном ветре. (б) Ослабление ударных волн в ударном слое между гелиосферной ударной волной (TS) и гелиопаузой (HP).

В разделе 2.4. представлены результаты численного решения задачи с граничными условиями второго типа (рис. 2 (b)). Периодические скачки скорости представляют собой произвольные разрывы в потоке солнечного ветра. В результате распада произвольных разрывов возникает сложная структура течения, состоящая из последовательности пар передних и обратных ударных волн, которые образуются при распаде скачков возрастания скорости (рис. 2(b)), и волн разрежения,

образующихся при распаде скачков убывания скорости. Подобная конфигурация течения возникает в солнечном ветре при распространении коротационных областей взаимодействия. На основе анализа полученных результатов выявлен механизм ослабления интенсивности ударных волн, распространяющихся в гелиосферный ударный слой (Рис. 4), вследствие (1) взаимодействия ударных волн с волнами разрежения в сверхзвуковом солнечном ветре и (2) взаимодействия ослабленных ударных волн с гелиосферной ударной волной. Обнаружено качественное согласование результатов моделирования с наблюдениями на Вояджере 2 в период солнечного минимума.

В разделе 2.5 сформулированы основные выводы по результатам, полученным в главе 2: 1) в результате распада произвольного разрыва скорости в потоке солнечного ветра образуется структура течения, состоящая из двух ударных волн – передней и обратной – и контактной поверхности между ними. При распространении в сверхзвуковом солнечном ветре скачки параметров плазмы на ударных волнах уменьшаются. При прохождении возмущения через гелиосферную ударную волну в ударном слое возникает сложная структура течения, состоящая из ударной волны, тангенциальных разрывов и быстрых волн разрежения. Взаимодействие ударной волны и гелиопаузы приводит к образованию быстрых магнитозвуковых волн, распространяющихся обратно в ударный слой; 2) выявлен эффект существенного ослабления интенсивности ударных волн, распространяющихся в гелиосферный ударный слой, вследствие их взаимодействия с волнами разрежения в сверхзвуковом солнечном ветре. Получено качественное согласование результатов модели с наблюдениями коротационных ударных волн на Вояджере 2.

Глава 3 посвящена моделированию взаимодействия холодного нейтрального межзвездного облака с горячей окружающей плазмой в рамках двухкомпонентной газодинамической модели. В модели учитывается процесс перезарядки нейтральных атомов и протонов плазмы, а также проводится качественная оценка влияния электронной теплопроводности в плазме.

В разделе 3.1 дан обзор существующих однокомпонентных моделей взаимодействия нейтральных/частично-ионизованных межзвездных облаков с окружающим горячим газом. В рамках МГД и гидродинамических моделей учитывались различные эффекты, такие как процессы теплопроводности, влияние магнитного поля, фотоионизации, радиационного охлаждения и нагрева. Однако процесс перезарядки, который может оказывать влияние на динамику структуры области взаимодействия нейтрального и ионизованного газа, в существующей литературе исследован не был. Также, процесс перезарядки между сильно заряженными ионами плазмы и нейтральными атомами приводит к возникновению рентгеновского излучения. Этот механизм может быть показан с помощью реакции:



При переходе электрона от нейтрального атома H к иону  $X^{+n}$ , ион переходит в возбужденное состояние  $X^{+(n-1)*}$ . В результате серии процессов высвечивания испускаются фотоны с энергиями из рентгеновского диапазона. Долгое время считалось, что роль процесса перезарядки в генерации рентгеновского излучения от астрофизических объектов незначительна, поскольку основным источником рентгеновского излучения в космическом пространстве является нагретая до высокой температуры плазма  $T \sim 10^6 - 10^7$  К. В работе [7] сделана оценка рентгеновского излучения вследствие перезарядки для удаленных астрофизических явлений, в которых частично-ионизованный газ взаимодействует в горячей плазме: а) галактический ветер, взаимодействующий с холодным плотным облаком гало; б) высокоскоростное холодное облако, движущееся в горячем газе гало; в) плотные межзвездные облака, движущиеся в горячем газе, окружающем скопления галактик. Оценки в работе [7] показали, что в этих случаях интенсивность рентгеновского излучения вследствие перезарядки и интенсивность диффузного рентгеновского излучения от горячего газа – величины одного порядка.

В разделе 3.2 сформулирована новая газодинамическая модель взаимодействия холодного нейтрального облака с горячей плазмой в рамках двухкомпонентного подхода. При взаимодействии нейтрального или частично-

ионизованного газа и плазмы могут существовать области, в которых установление локального термодинамического равновесия между нейтральной и заряженной компонентами происходит медленнее, чем внутри каждой из компонент в отдельности. Поэтому для моделирования таких областей используется двухкомпонентный подход. В модели учитывается процесс перезарядки между нейтральными атомами и протонами плазмы. Для каждой из компонент (нейтральной и заряженной) решается система уравнений Эйлера с источниковыми членами в правых частях, которые описывают влияние перезарядки. Начальные условия задачи задают равенство давлений в покоящихся холодном плотном нейтральном облаке и горячей разреженной плазме. Решение задачи в безразмерном виде определяется двумя безразмерными параметрами: отношением концентраций частиц в облаке и плазме  $\hat{n} = n_H / n_p$  и безразмерным радиусом облака  $\hat{R}_c = R_c / L$ . Значения определяющих параметров принимались из диапазонов:  $\hat{n} = [100, 1000]$ ,  $\hat{R}_c = [10, 50]$ . В таблице 1 приведены параметры для  $\hat{n} = 285$ . Данный набор соответствует Локальному межзвездному облаку, в котором движется Солнце, в горячей плазме Локального пузыря.

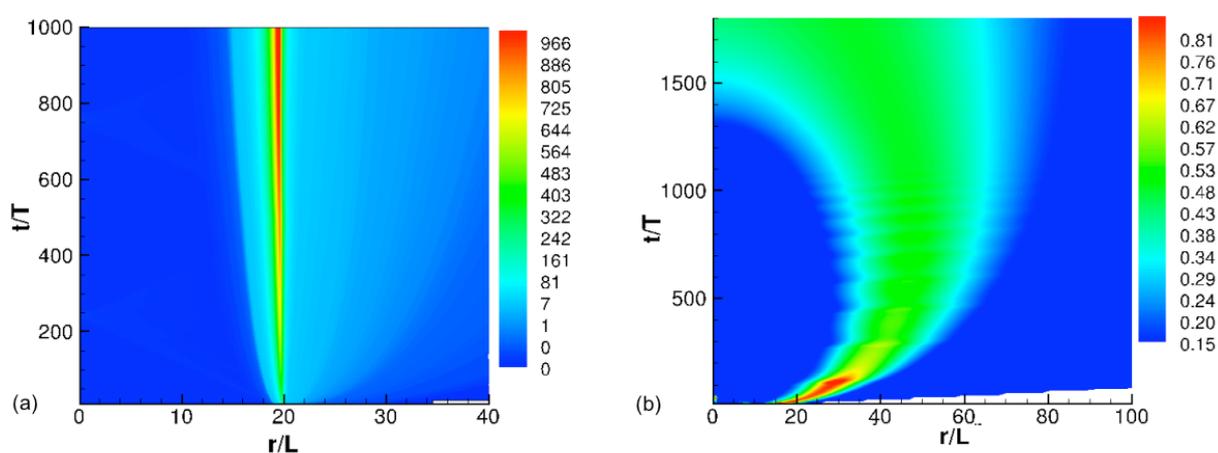
	Нейтральное облако $R_c=3$ пк	Горячая плазма
Концентрация, $n$	$0.25 \text{ см}^{-3}$	$0.0009 \text{ см}^{-3}$
Скорость, $V$	0	0
Температура, $T$	7000 К	$10^6$ К

Таблица 1. Начальные условия в задаче о взаимодействии Локального межзвездного облака и горячей плазмы Локального пузыря.

В рамках модели рассматривается два предельных случая взаимодействия нейтрального газа и плазмы: 1) «адиабатический», когда процессами теплопроводности в плазме пренебрегается, и приток энергии в плазменную компоненту происходит только за счет процесса перезарядки; 2) изотермический,

при котором предполагается что процесс электронной теплопроводности приводит к мгновенному прогреву плазмы в переходной области.

Сформулированная задача решается численно методом Годунова с использованием ограничителя возрастания вариаций функций параметров *minmode* для повышения порядка точности схемы. При численном решении применяется методика выделения газодинамических разрывов. В качестве подвижных границ сетки по пространству выбираются газодинамические разрывы – ударные волны, контактные разрывы и фронты волн разрежения, образовавшиеся в нейтральной или плазменной компонентах.



**Рис. 5.** Частота перезарядки в зависимости от расстояния от центра облака и времени с начала взаимодействия нейтрального облака и плазмы. Величины показаны в безразмерных единицах. (а) Адиабатический случай; (б) Изотермический случай.

В разделе 3.3 представлены результаты численного моделирования взаимодействия холодного нейтрального облака с горячей плазмой. Описана газодинамическая структура границы нейтрального облака в рамках «адиабатической» модели, и исследована роль процесса перезарядки в эволюции переходной области со временем. На рис. 5 (а) представлено распределение частоты перезарядки между нейтральными атомами водорода и протонами плазмы в зависимости от расстояния от центра облака и времени. В переходной области на границе облака частота перезарядки максимальна вследствие больших концентраций нейтральных атомов и плазмы. В «адиабатическом» случае в

отсутствии процессов теплопроводности граница облака остается неподвижной в течение времени взаимодействия.

Затем описано взаимодействие нейтрального облака с горячей изотермической плазмой, при котором происходит нагрев облака, и облако исчезает за характерное время порядка 1 млн. лет. Как и в «адиабатическом» случае частота перезарядки нейтральных атомов и протонов плазмы максимальна в переходной области на границе облака (Рис. 5 (б)).

В разделе 3.4 на основе распределений газодинамических параметров плазмы и нейтрального газа, полученных в модели, проводится оценка интенсивности рентгеновского излучения вследствие перезарядки тяжелых сильно заряженных ионов плазмы и нейтральных атомов в переходной области на границе межзвездного облака для двух моделей: «адиабатической» и изотермической. Полученная интенсивность сравнивается с интенсивностью диффузного излучения от протяженных областей в межзвездной среде, заполненных горячей плазмой. В рамках изотермической модели интенсивности оказываются одного порядка.

В разделе 3.5 в рамках изотермической модели взаимодействия холодного нейтрального облака с горячей плазмой определены времена жизни Локальных межзвездных облаков, окруженных горячей плазмой Локального пузыря. Проведено сравнение результатов двухкомпонентной модели с результатами существующих однокомпонентных моделей.

В разделе 3.6 сформулированы выводы по результатам, полученным в главе 3: 1) Взаимодействие холодного нейтрального газа облака и окружающей горячей плазмы в процессе перезарядки приводит к формированию переходной области на границе облака со значительными концентрациями нейтрального газа и плазмы. В переходной области температура газа и плазмы принимает все промежуточные значения от  $T_1$  в холодном облаке до  $T_2$  в горячей плазме. 2) В «адиабатической» модели облако остается холодным в течение всего времени взаимодействия, а его граница – неподвижной. В изотермической модели облако нагревается и «испаряется» за конечное время. 3) Интенсивность рентгеновского излучения

вследствие перезарядки от узких переходных областей на границе межзвездных облаков сравнима с интенсивностью рентгеновского излучения от протяженных горячих областей в межзвездной среде.

**Заключение** содержит основные результаты диссертационной работы.

### **Основные результаты работы.**

Результаты диссертации, выносимые на защиту:

1. Исследовано распространение возмущения в солнечном ветре, включающего в себя две ударных волны (переднюю и обратную), в область гелиосферного ударного слоя в рамках трехмерной МГД модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС. Показано, что в гелиосферном ударном слое возникает сложная структура течения: за впереди идущей ударной волной образуется возмущенная область течения с тангенциальными разрывами и быстрыми волнами разрежения. В результате взаимодействия впереди идущей ударной волны и гелиопаузы образуется быстрая магнитозвуковая волна, распространяющаяся обратно в ударный слой и взаимодействующая с гелиосферной ударной волной. Отраженная от ударной волны магнитозвуковая волна сносится потоком солнечного ветра в хвостовую часть гелиосферы.
2. Теоретически обоснован эффект ослабления интенсивности коротационных ударных волн в гелиосферном ударном слое. Показано, что в результате взаимодействия передних и обратных ударных волн с волнами разрежения в сверхзвуковом солнечном ветре скачки параметров на обратных волнах становятся пренебрежимо малы, передние ударные волны ослабевают. В результате взаимодействия слабых передних ударных волн с гелиосферной ударной волной в ударный слой распространяются малые возмущения параметров плазмы. Получено качественное согласование результатов с наблюдениями на Вояджере 2 в период солнечного минимума.
3. Разработана двухкомпонентная газодинамическая модель взаимодействия

холодного нейтрального межзвездного облака с окружающей горячей плазмой, учитывающая процесс перезарядки. Исследована газодинамическая структура переходной области на границе холодного межзвездного облака. Показано, что взаимодействие нейтрального газа и плазмы в процессе перезарядки приводит к формированию переходной области на границе облака со значительными концентрациями атомов водорода и протонов плазмы. В рамках модели исследовано влияние эффективного процесса электронной теплопроводности в плазме. При взаимодействии с горячей изотермической плазмой облако нагревается и «испаряется» за конечное время. Оценка времени существования Локального межзвездного облака, в котором движется Солнце, составляет порядка 1.5 млн лет.

4. Исследована роль процесса перезарядки сильно заряженных ионов плазмы и нейтральных атомов в генерации рентгеновского излучения в областях взаимодействия холодного нейтрального газа и горячей плазмы в межзвездной среде. В рамках двухкомпонентной модели получено, что интенсивность рентгеновского излучения вследствие перезарядки от сравнительно узких переходных областей на границе межзвездных облаков сравнима по величине с интенсивностью диффузного рентгеновского излучения от окружающей их горячей плазмы.

## **Работы автора по теме диссертации**

1. *Provornikova E.A., Opher M., Izmodenov V.V., Toth G. Propagation into the heliosheath of a large-scale solar wind disturbance bounded by a pair of shocks // Astron. and Astrophys. 2013. V. 552. A99. DOI: 10.1051/0004-6361/201220892.*
2. *Provornikova E.A., Opher M., Izmodenov V.V., Toth G. Do corotating interaction region associated shocks survive when they propagate into the heliosheath? // The Astrophys. J. Lett. 2012. V. 756. Issue 2. ID L37.*

3. *Provornikova E.A., Izmodenov V.V., Lallement R.* Two-component model of the interaction of an interstellar cloud with surrounding hot plasma // *MNRAS*. 2011. V. 415. Issue 4. P. 3879-3886.
4. *Provornikova E.A., Izmodenov V.V., Lallement R.* Charge transfer reactions at interfaces between neutral gas and plasma: Dynamical effects and X-ray emission// *Astronomical Notes*. 2012. V.333. N 4. P. 4393-4397. DOI 10.1002/asna.201211680.
5. *Проворникова Е.А., Алексашов Д.Б., Измодепов В.В.* Газодинамическое моделирование взаимодействия нейтральных межзвездных облаков с окружающей их горячей плазмой // Сборник «Актуальные проблемы механики». – М.: ИПМех РАН. Москва. 2010. с.125-150.
6. *Provornikova E.A., Izmodenov V.V., Lallement R.* Role of charge exchange in the interaction of cold neutral gas and hot plasma // *THE LOCAL BUBBLE AND BEYOND II: Proceedings of the International Conference*. AIP Conference Proceedings. 2009. V. 1156. P. 280-284.
7. *Проворникова Е.А., Измодепов В.В.* Двухкомпонентная газодинамическая модель взаимодействия холодного нейтрального газа и горячей плазмы с учетом процесса перезарядки и электронной теплопроводности // Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем»: Сборник научных трудов. – М.: ИПМех РАН. 2008. с. 98-102.

### **Список используемой литературы**

1. *Richardson J.D., Wang C.* Plasma in the heliosheath: 3.5 years of observations// *The Astrophys. J. Lett*. 2011. V. 734. L21.
2. *Izmodenov V.V., Malama Y.G. Ruderman M.S., Chalov S.V., Alexashov D.B., Katushkina O.A., Provornikova E.A.* Kinetic-gasdynamic modeling of the heliospheric interface // *Space Science Reviews*. 2009. V. 146. Issue 1-4. P. 329-351.
3. *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. P. 15157-15163.
4. *McNutt R.L., Lyon J., Goodrich C.C.* Simulation of the heliosphere: Model// *J. of Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 1905.
  5. *Alexashov D., Izmodenov V. V.* Kinetic vs. multi-fluid models of H atoms in the heliospheric interface: a comparison// *Astron. Astrophys.* 2005. V. 439. P. 1171-1181.
  6. *Parker E.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. №3. P. 664-676.
  7. *Lallement R.* On the contribution of charge-exchange induced X-ray emission in the ISM and ICM// *Astron. Astrophys.* 2004. V. 422. P. 391–400.
  8. *Izmodenov V.V., Alexashov D.B.* Multi-component 3D modeling of the heliospheric interface: effects of interstellar magnetic field// *AIP Conf. Proc.* 2006. V. 858. P. 14–19.
  9. *Baranov V.B., Barmin A.A., Pushkar E.A.* On the interaction of interplanetary shock waves with a stationary shock wave in the solar wind: oblique magnetohydrodynamic interaction// *Astron. Lett.* 1996. V. 22. P. 555-561.
  10. *Baranov V. B. Pushkar, E. A.* Possible crossing of the termination shock in the solar wind by the Voyager 1 spacecraft// *Astron. Lett.* 2004. V. 30. P. 179-186.