

На правах рукописи

**ЧАЛОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ  
ЧАСТИЦ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ 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 - 2008**

Работа выполнена в Институте проблем механики Российской академии наук.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
Бережко Е.Г. (ИКФИА СО РАН)

доктор физико-математических наук,  
Птускин В.С. (ИЗМИРАН)

доктор физико-математических наук,  
Чашей И.В. (ФИАН)

**Ведущая организация:** Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Защита состоится 29 апреля 2008 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.03. при Институте космических исследований РАН по адресу: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт космических исследований, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



Буринская Т.М.

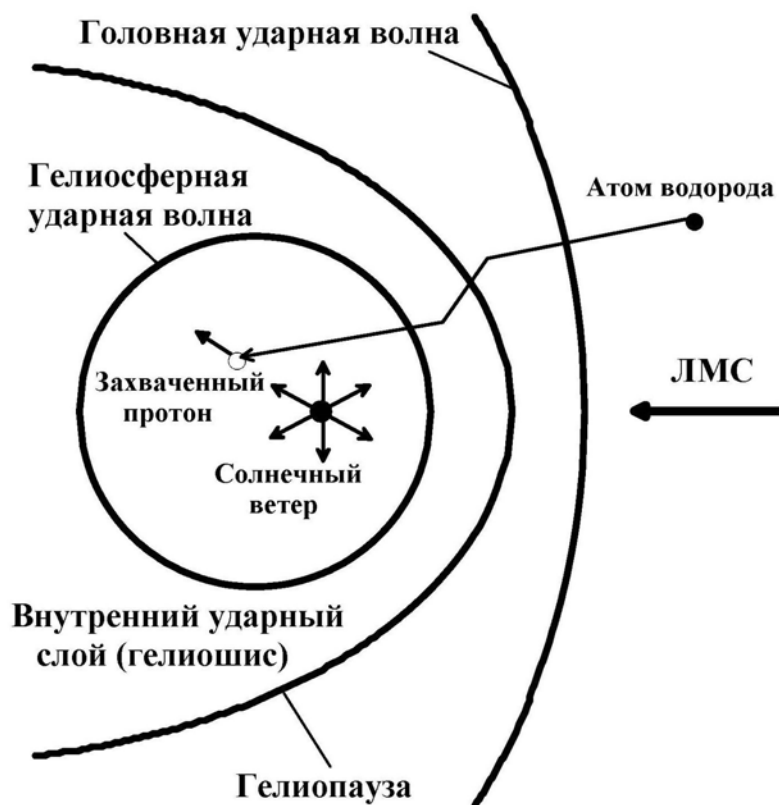
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Локальное межзвездное облако, в котором в настоящее время находится Солнце, состоит из частично ионизованного газа, причем концентрация нейтральных атомов (в основном это атомы водорода) существенно превышает концентрацию заряженной компоненты (Lallement, 1996). В результате «столкновения» сверхзвукового солнечного ветра с набегающим потоком локальной межзвездной среды (ЛМС), скорость которого согласно современным данным о параметрах ЛМС (Möbius, 2004) также является сверхзвуковой, образуется область взаимодействия двух потоков (гелиосферный интерфейс). Эта область имеет достаточно сложную структуру, включающую ударные волны, на которых происходит торможение потоков, и границу (тангенциальный разрыв), разделяющую заряженные компоненты солнечного ветра и межзвездной среды. Впервые модель взаимодействия солнечного ветра со сверхзвуковым потоком полностью ионизованной межзвездной среды была предложена Барановым и др. (1970) в приближении тонкого слоя, т.е. считалось, что характерная толщина области взаимодействия намного меньше гелиоцентрического расстояния до этой области. Наиболее адекватная теоретическая модель гелиосферного интерфейса, корректно описывающая движение межзвездных атомов водорода и процесс их взаимодействия с заряженной компонентой, была разработана Барановым и Маламой (Baranov & Malama, 1993). Здесь следует отметить, что главным механизмом взаимодействия атомов с протонами солнечного ветра и межзвездной среды является перезарядка. Основная сложность при построении такого рода моделей состоит в том, что длина свободного пробега атомов в гелиосфере сравнима с ее размерами. Другими словами, если динамику заряженной компоненты можно описывать в рамках гидродинамического приближения, то для атомов необходимо использовать кинетическое уравнение для функции распределения по скоростям. Именно такой подход и был реализован в кинетико-газодинамической модели Баранова и Маламы.

На рис.1 показана качественная картина области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС. Торможение и нагрев сверхзвукового солнечного ветра происходит на гелиосферной ударной волне. Торможение межзвездной плазмы осуществляется на головной ударной волне. Плазменные компоненты солнечного ветра и межзвездной среды разделяются поверхностью тангенциального разрыва скорости и плотности (гелиопаузой). Область нагретого солнечного ветра между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой называется внутренним ударным слоем (внутренним гелиошисом). Воздействие атомов на плазменное течение

приводит к торможению и нагреву сверхзвукового солнечного ветра и к приближению ударных волн и гелиопаузы к Солнцу (Baranov & Malama, 1993). Другим интересным эффектом, связанным с наличием межзвездных атомов, является формирование области повышенной концентрации атомов («водородной стенки») перед гелиопаузой со стороны ЛМС. «Водородная стенка» впервые была теоретически предсказана в работе Baranov et al. (1991). Основные предсказания кинетико-газодинамической



*Рис.1. Схематическое изображение области взаимодействия солнечного ветра со сверхзвуковым потоком локальной межзвездной среды (ЛМС). Торможение и нагрев солнечного ветра и плазменной компоненты межзвездной среды происходит на гелиосферной и головной ударных волнах соответственно. Солнечный ветер и межзвездная среда разделяются поверхностью тангенциального разрыва – гелиопаузой. Область нагретого в ударной волне солнечного ветра образует внутренний ударный слой. На рисунке показана траектория атома водорода, проникающего в сверхзвуковой солнечный ветер, где в результате ионизации атома образуется захваченный протон.*

модели были впоследствии подтверждены экспериментально. Например, «водородная стенка» была обнаружена при интерпретации спектров поглощения от звезд, измеряемых на космическом аппарате Hubble Space Telescope (Linsky & Wood, 1996). В декабре 2004 г. космический аппарат

Voyager 1 пересек гелиосферную ударную волну на расстоянии 94 а.е. (Fisk, 2005), очень близком к теоретическому. Таким образом, модель Баранова-Маламы достаточно хорошо описывает крупномасштабную структуру гелиосферного интерфейса и широко используется при интерпретации измерений на космических аппаратах. С другой стороны, исходная базовая модель (Baranov & Malama, 1993) не учитывала ряд факторов, таких, например, как межзвездное и межпланетное магнитные поля, цикл солнечной активности, космические лучи. В настоящей диссертационной работе исследуются вопросы переноса и ускорения заряженных энергичных частиц в солнечном ветре, а также эффекты, связанные с влиянием этих частиц на течение плазмы в гелиосфере.

Помимо отмеченных выше эффектов ионизация межзвездных атомов приводит к образованию в солнечном ветре специфической популяции энергичных ионов – захваченных межзвездных ионов. В системе координат, связанной с солнечным ветром, скорости этих ионов в момент образования равны локальной скорости солнечного ветра. Первоначально считалось, что обмен энергией между захваченными ионами и ионами солнечного ветра происходит достаточно быстро, так что они практически мгновенно становятся неотличимыми. Однако, прямые измерения захваченных ионов гелия (Möbius et al., 1985) и захваченных протонов (Gloeckler et al., 1993) показали, что скоростные распределения захваченных ионов очень сильно отличаются от скоростных распределений оригинальных ионов солнечного ветра, т.е. они являются особой очень горячей компонентой. Исследование процессов переноса и ускорения захваченных ионов представляет большой интерес для физики гелиосферы. Здесь можно отметить, по крайней мере, три важных обстоятельства. Во-первых, во внешних областях гелиосферы, начиная с нескольких десятков а.е., термодинамика солнечного ветра полностью определяется захваченными межзвездными протонами из-за их высоких тепловых скоростей и достаточно высокой концентрацией (до 30 % от концентрации солнечных протонов перед фронтом гелиосферной ударной волны). Таким образом, структура и интенсивность гелиосферной ударной волны существенно зависят от свойств захваченных ионов. Во-вторых, специфические свойства захваченных ионов натолкнули на мысль о том, что именно эти частицы являются источником аномальной компоненты космических лучей (Fisk et al., 1974). В свою очередь, плотность энергии аномальной компоненты в области гелиосферного интерфейса достаточно высока для того, чтобы она могла оказывать динамическое влияние на течение солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны и во внутреннем ударном слое. В-третьих, измерения параметров захваченных ионов во внутренних областях гелиосферы (на аппаратах ACE и Ulysses) позволяют получить важную информацию о параметрах ЛМС (Gloeckler et al., 2004). Кроме того, в 2008 г. планируется запуск космического аппарата

IBEX (Interstellar Boundary Explorer). Основная цель эксперимента – измерение на 1 а.е. от Солнца потоков энергичных нейтральных атомов, рождающихся во внутреннем ударном слое в результате перезарядки. Так как концентрация захваченных протонов в этой области сравнима с концентрацией солнечных протонов, а их энергетические распределения гораздо шире и разнообразней, то теоретическое исследование спектральных характеристик захваченных протонов во внутреннем ударном слое чрезвычайно важно для интерпретации измерений на аппарате IBEX.

Таким образом, можно заключить, что захваченные межзвездные ионы и аномальная компонента космических лучей оказывают существенное динамическое и термодинамическое влияние на течение солнечного ветра во внешних областях гелиосферы, на параметры и структуру гелиосферной ударной волны. Энергичные заряженные частицы также несут информацию о тех областях внешней гелиосферы, которые в настоящее время недоступны для космических аппаратов. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью предсказания и интерпретации экспериментальных данных, получаемых на космических аппаратах.

## **Цели и задачи работы**

Главной целью работы является исследование процессов ускорения и переноса энергичных заряженных частиц в гелиосфере и их влияния на течение и устойчивость плазмы солнечного ветра в области его взаимодействия с локальной межзвездной средой. Так как основной интерес для нас представляют удаленные области гелиосферы, то энергичные частицы, образующиеся вблизи Солнца, например, в результате вспышек, в расчет не принимаются. В качестве энергичных заряженных частиц в работе рассматриваются два сорта частиц: захваченные межзвездные ионы и космические лучи. Эти сорта существенно различаются по энергиям и концентрациям, однако в области гелиосферного интерфейса плотности их внутренних энергий могут быть сравнимы. В работе рассматриваются следующие задачи:

1. Устойчивость течения плазмы перед фронтом магнито-гидродинамических ударных волн с учетом динамического влияния космических лучей (приложение к гелиосферной ударной волне).

2. Устойчивость тангенциального разрыва скорости в плазме с учетом динамического влияния космических лучей (приложение к гелиопаузе).

3. Динамическое влияние аномальной компоненты космических лучей на структуру области взаимодействия солнечного ветра с ЛМС, интенсивность и положение гелиосферной и головной ударных волн.

4. Образование и распространение захваченных межзвездных ионов в солнечном ветре с учетом анизотропии их скоростного распределения.

5. Ускорение захваченных ионов в сверхзвуковом солнечном ветре и на гелиосферной ударной волне. Механизмы «инжекции» захваченных ионов в режим регулярного ускорения до энергий аномальной компоненты космических лучей.

6. Свойства энергетических и пространственных распределений захваченных протонов в области внутреннего ударного слоя (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой).

7. Энергичные атомы водорода из внутреннего ударного слоя и образование высокоскоростных «хвостов» в распределениях захваченных протонов в периоды спокойного солнечного ветра.

8. Захваченные межзвездные протоны и нагрев сверхзвукового солнечного ветра во внешних областях гелиосферы.

## **Методика исследований**

При исследовании физических процессов в гелиосфере использовались как аналитические методы (асимптотические, метод многих масштабов и др.), так и численные. Для численного решения уравнения Фоккера-Планка для функции распределения захваченных ионов по скоростям использовалась его математическая эквивалентность определенной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих стохастические члены с гауссовским распределением вероятностей. Каждое из решений системы является стохастической траекторией в фазовом пространстве. Для определения плотности частиц в фазовом пространстве необходимо "разыграть" достаточное количество стохастических траекторий (в зависимости от требуемой точности расчетов). Для численного решения системы использовался метод Эйлера.

## **Научная новизна**

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, являются оригинальными. Для численного нахождения скоростных и пространственных распределений захваченных ионов в гелиосфере впервые использовалось описание, основанное на обыкновенных стохастических дифференциальных уравнениях. Такой подход позволяет относительно просто и унифицировано решать достаточно сложные многомерные (в фазовом пространстве) задачи.

## **Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные положения:**

1. Исследована устойчивость течения плазмы перед фронтом магнитогидродинамической ударной волны с учетом динамического

влияния космических лучей и с учетом всех членов тензора пространственной диффузии. Показано, что достаточно сильная ударная волна неустойчива по отношению к быстрым магнитозвуковым колебаниям. Если магнитное поле достаточно сильное, то неустойчивые волны с наибольшими инкрементами распространяются под углом к вектору магнитного поля. Для квазиперпендикулярной ударной волны наиболее неустойчивые магнитозвуковые колебания распространяются перпендикулярно плоскости, образованной векторами магнитного поля и скорости плазмы (в системе координат, движущейся вместе с плазмой). При этом инкременты неустойчивости определяются недиагональными членами тензора диффузии, которые описывают дрейфовое движение энергичных частиц. В случае гелиосферной ударной волны в области низких гелиоширот волны с наибольшими инкрементами распространяются перпендикулярно плоскости эклиптики, причем направление их распространения зависит от знака полярности солнечного магнитного поля.

2. Показано, что в смеси тепловой плазмы и газа космических лучей появляется новая неустойчивая мода колебаний тангенциального разрыва скорости. В некотором смысле она аналогична неустойчивой моде, которая появляется в гидродинамических сдвиговых течениях при учете слабой диссипации. Свойства новой моды существенно отличаются от свойств классической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Например, в случае сверхзвукового течения с большим числом Маха волновые векторы новых неустойчивых колебаний на поверхности разрыва лежат в угловых секторах, содержащих вектор относительной скорости плазмы. В классической же неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в этом случае неустойчивые волны распространяются почти под прямым углом к вектору относительной скорости.

3. В рамках двухмерной кинетико-газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с частично ионизованной локальной межзвездной средой исследовано динамическое влияние аномальной компоненты космических лучей на структуру области взаимодействия, интенсивность и положение гелиосферной и головной ударных волн. Показано, что включение в модель аномальной компоненты приводит к увеличению гелиоцентрического расстояния до гелиосферной ударной волны (на несколько астрономических единиц).

4. Детально исследован процесс переноса захваченных межзвездных ионов в солнечном ветре на основе численного решения кинетического диффузионного уравнения, описывающего все основные физические процессы: образование захваченных ионов, их конвективный перенос, адиабатическое охлаждение в расширяющемся солнечном ветре, адиабатическую фокусировку в неоднородном магнитном поле, рассеяние по питч-углам, диффузию в пространстве энергий. Для решения



диффузионного уравнения использовалась его эквивалентность системе обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений. Показано, в частности, что начальная анизотропия функции распределения захваченных ионов гелия в области солнечного гравитационного конуса приводит к угловому смещению (в плоскости эклиптики) пространственного распределения ионов относительно гравитационного конуса, состоящего из атомов гелия, в направлении вращения Земли вокруг Солнца. Величина смещения зависит от уровня турбулентности солнечного ветра (или длины свободного пробега ионов). Отсутствие подобного смещения в измерениях на аппарате ACE (Advanced Composition Explorer) связано с тем обстоятельством, что установленный на нем прибор SWICS (Solar Wind Ion Composition Spectrometer) регистрирует и идентифицирует только часть ионов с определенными величинами и направлениями скоростей.

5. Показано, что пространственная асимметрия гелиосферной ударной волны, возникающая вследствие воздействия на солнечный ветер набегающего потока межзвездной среды, приводит к тому, что эффективность дрейфового ускорения захваченных ионов на ударной волне существенно зависит от углового положения области ускорения относительно вектора скорости межзвездной среды. Это обстоятельство объясняется изменением вдоль фронта волны угла между вектором межпланетного магнитного поля и нормалью к фронту. Таким образом, эффективность ускорения в интервале энергий от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ оказывается наиболее высокой вблизи флангов ударной волны, где она является квазиперпендикулярной.

6. Исследованы энергетические и пространственные распределения захваченных протонов в области внутреннего ударного слоя (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой). Показано, что спектры захваченных протонов в этой области качественно отличаются от спектров в сверхзвуковом солнечном ветре - в них образуются провалы из-за перезарядки между захваченными протонами и межзвездными атомами водорода.

7. Показано, что лобовая область внутреннего ударного слоя является идеальным местом для стохастического ускорения заряженных энергичных частиц. Даже при относительно низком уровне турбулентности солнечного ветра ионы могут ускоряться до энергий порядка 10 МэВ/нуклон. Этот вывод основан на двух обстоятельствах. Во-первых, характерные времена, в течение которых солнечный ветер движется в этой области и, следовательно, энергичные частицы подвергаются ускорению, составляют несколько десятков лет (время движения солнечного ветра от Солнца до гелиосферной ударной волны около года). Во-вторых, дивергенция скорости солнечного ветра в этой области отрицательная. Другими словами, вместо адиабатического

охлаждения частиц, характерного для расширяющегося сверхзвукового солнечного ветра, в ударном слое частицы испытывают адиабатический нагрев.

8. Показано, что высокоскоростные «хвосты» в спектрах захваченных протонов, измеряемые на космических аппаратах Ulysses и ACE в спокойном солнечном ветре, когда эффективность стохастического ускорения мала, могут образовываться из-за ионизации энергичных атомов водорода. Эти атомы проникают в достаточно близкие к Солнцу области из внутреннего ударного слоя, где они образуются вследствие перезарядки разогретых и ускоренных захваченных протонов с межзвездными атомами водорода.

9. Во внешней гелиосфере ( $r \geq 10$  а.е.) альвеновская турбулентность в области коротких волн почти полностью обусловлена источником, связанным с неустойчивостью начального анизотропного распределения захваченных протонов. Основная доля генерируемой турбулентной энергии поглощается самими захваченными протонами в результате циклотронно-резонансного взаимодействия частиц с волнами, и лишь незначительная часть этой энергии может передаваться протонам солнечного ветра и приводить к их нагреву во внешних областях гелиосферы. Поглощение турбулентной энергии захваченными протонами приводит к их ускорению, носящему стохастический характер.

### **Достоверность результатов**

Результаты работы получены с помощью аналитических и (или) численных методов. Аналитические методы, использовавшиеся в работе, имеют строгое математическое обоснование, и корректность их применения проверена многолетней практикой. Для численного решения кинетического уравнения для функции распределения захваченных ионов по скоростям (уравнения типа Фоккера-Планка) использовалась эквивалентность этого уравнения системе обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений. Указанная эквивалентность формулируется в виде математической теоремы. Процедура решения самой системы обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений проблемы не представляет, а точность решений проверялась варьированием временных, пространственных и скоростных шагов. Кроме того, численный метод решения той или иной задачи проверялся на тестовых задачах. Что касается физической стороны вопроса, то в работе использовались известные принципы, основанные на фундаментальных законах сохранения. Достоверность результатов, представленных в диссертации, основана не только на использовании общепризнанных моделей физических процессов и на строгой математической аргументации, но и на совпадении с данными экспериментов.

## **Практическая ценность**

Результаты, полученные в работе, используются или могут быть использованы для интерпретации измерений параметров солнечного ветра, энергичных заряженных частиц и энергичных атомов из внутреннего ударного слоя на космических аппаратах Voyager 1/2 (плазменные измерения и энергичные частицы), ACE и Ulysses (измерения захваченных межзвездных ионов), SOHO и IBEX (измерения спектров энергичных атомов).

Кроме того, основные результаты, касающиеся энергетических и пространственных распределений захваченных протонов во внешних областях гелиосферы, и разработанные численные методы могут быть использованы для усовершенствования имеющихся глобальных кинетико-газодинамических моделей гелиосферного интерфейса.

## **Апробация работы**

Результаты диссертации обсуждались и получили одобрение на семинарах под руководством академика Г.И. Петрова (ИКИ РАН), проф. В.Б. Баранова (ИПМех РАН), проф. Л.И. Дормана (ИЗМИРАН), а также на семинарах в Астрономическом институте им. Н. Коперника (Варшава, Польша), Центре космических исследований Польской академии наук (Варшава, Польша), Институте астрофизики и внеземных исследований Боннского университета (Бонн, Германия), Институте радиоастрономии ННИО им. М. Планка (Бонн, Германия), Международном институте космических исследований (Берн, Швейцария), Центре космических исследований (Лёвен, Бельгия).

Основные положения диссертации докладывались на VII всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике (1991, Москва) и на международных конференциях: "Космическая газовая динамика" (1988, Москва), "Physics of the outer heliosphere" (1989, Варшава, Польша), XX General Assembly of European Geophysical Society - Solar and Heliospheric Physics (1995, Гамбург, Германия), "Corotating interaction regions" (1998, Берн, Швейцария), "Прогресс в космической газовой динамике" (1999, Москва), "Outer heliosphere: next frontiers" (2000, Потсдам, Германия), "Physical parameters of the LISM trough coordinate observations of the gravitational focusing cone" (2000, 2001, 2002, Берн, Швейцария), 35-th COSPAR Scientific Assembly - Dynamical Heliosphere (2004, Париж, Франция), "Future perspectives in heliospheric research" (2005, Бад Хоннеф, Германия), «XVIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды» (2007, Саратов).

Исследования автора были поддержаны и одобрены проектами РФФИ, РФФИ-ННИО, программой ОЭММПУ фундаментальных исследований

РАН «Интегрированные модели физической механики», а также международными грантами INTAS и CRDF.

### **Публикации и личный вклад автора**

Вклад автора в решение задач, представленных в диссертации, является основным. Исключение составляет лишь п. 3 основных положений, выносимых на защиту, в котором роль автора состояла в постановке задачи и физической интерпретации результатов численных расчетов. Что касается остальных задач, то автору принадлежит главная роль в их постановке, решении, интерпретации полученных результатов и, в итоге, в написании статей для научных изданий. Все результаты диссертационной работы опубликованы в 45 статьях в ведущих рецензируемых журналах и сборниках. Все основные результаты работы опубликованы в журналах из перечня ВАК.

### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 269 страниц, включая 62 рисунка и 242 наименования библиографии.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано краткое описание темы работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи работы, ее практическая ценность и научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту.

**В главе 1** обсуждаются основные свойства космических лучей как динамической компоненты космической плазмы, выписывается система гидродинамических уравнений для смеси тепловой плазмы и «газа» космических лучей, а также исследуется процесс распространения в такой смеси слабонелинейных акустических волн.

Космические лучи являются одной из компонент космической плазмы. Они представляют собой заряженные частицы с очень низкой концентрацией (по сравнению с концентрацией тепловой плазмы) и очень большими энергиями (наиболее энергичные частицы являются ультрарелятивистскими). На астрономических масштабах космические лучи можно рассматривать как разреженный (безмассовый) и очень горячий газ, плотность энергии которого сравнима с плотностью энергии тепловой плазмы и магнитного поля (Березинский и др., 1984). Последнее означает, что газ космических лучей может оказывать существенное

динамическое влияние на движение космической плазмы. Обычно, когда речь идет о динамическом влиянии, то имеется в виду ионная компонента космических лучей. Из этого вовсе не следует, что газ космических лучей несет какой-то электрический заряд. Он является квазинейтральным, как и тепловая компонента, просто плотность энергии электронов в этом газе существенно меньше плотности энергии ионной компоненты.

Многочисленные наблюдательные данные указывают на то, что распределение космических лучей по импульсам близко к изотропному (Гинзбург и Сыроватский, 1963; Березинский и др., 1984). Это обстоятельство обусловлено эффективным рассеянием космических лучей на флуктуациях электрического и магнитного поля в межзвездной и межпланетной среде. Именно через эти флуктуации происходит обмен энергией между тепловой плазмой и газом космических лучей. Динамическое влияние газа космических лучей на течение тепловой плазмы учитывается введением плотности силы  $-\nabla p_c$  в уравнения движения, где  $p_c$  - давление космических лучей, которое является соответствующим моментом от функции распределения частиц по импульсам:

$$p_c(t, \mathbf{x}) = \int_0^{\infty} \frac{4\pi}{3} p v F(t, \mathbf{x}, p) dp \quad (1)$$

Впервые строгое обоснование такого подхода для смеси космических лучей и тепловой плазмы с замороженным случайным магнитным полем было дано Птускиным (1984). В этой работе рассматривается случай эффективного рассеяния частиц на случайных полях, когда их скоростное распределение близко к изотропному. В рамках диффузионного приближения показано, что давление космических лучей передается плазме через воздействие случайного магнитного поля, возникающего из-за флуктуаций рассеивающихся частиц, на случайные электрические токи в плазме.

Функция распределения  $F$  удовлетворяет известному транспортному уравнению, в котором учтены эффекты конвекции, адиабатического охлаждения или нагрева, а также пространственной диффузии, связанной с отклонением скоростного распределения от изотропного. При наличии достаточно сильного магнитного поля пространственная диффузия анизотропна и описывается тензором диффузии. Уравнение для  $p_c$  получается в результате интегрирования диффузионного уравнения для  $F$  по импульсам. Таким образом, замкнутая система уравнений для смеси тепловой плазмы и газа космических лучей состоит из уравнения неразрывности для плазмы, уравнений движения плазмы, в правые части которых входит сила  $-\nabla p_c$ , и двух уравнений для давления плазмы и давления космических лучей (двухжидкостная модель):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) &= 0, \\
\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} &= -\frac{\nabla(p_g + p_c)}{\rho} + \frac{[\text{rot} \mathbf{B}, \mathbf{B}]}{4\pi\rho}, \\
\frac{\partial p_g}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) p_g + \gamma_g p_g \nabla \mathbf{u} &= 0, \\
\frac{\partial p_c}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) p_c + \gamma_c p_c \nabla \mathbf{u} &= \nabla_\alpha \kappa_{\alpha\beta} \nabla_\beta p_c,
\end{aligned} \tag{2}$$

где  $\rho$  – плотность плазмы,  $\mathbf{u}$  – скорость,  $p_g$  - давление плазмы,  $\mathbf{B}$  – магнитное поле,  $\gamma_g$  и  $\gamma_c$  - показатели адиабаты и  $\kappa_{\alpha\beta}$  - осредненный по энергии тензор пространственной диффузии. При наличии магнитного поля добавляются соответствующие уравнения Максвелла.

Далее в этой главе в рамках двухжидкостной модели исследуются свойства слабонелинейных акустических волн произвольной длины, распространяющихся в смеси тепловой плазмы и газа космических лучей (Chalov, 1990a). Для этих целей используется метод многих масштабов. Влияние магнитного поля не учитывается. Предполагается, что давление газа космических лучей мало по сравнению с давлением тепловой плазмы. Динамическое взаимодействие идеальной тепловой плазмы с энергичными частицами (космическими лучами), для которых существенна пространственная диффузия, существенно влияет на свойства линейных и нелинейных волн. Для волн, распространяющихся в такой двухкомпонентной среде, становятся важными диссипативные и дисперсионные эффекты. В рамках классической идеальной газовой динамики любая плоская волна под влиянием нелинейных эффектов опрокидывается, т.е. ее пространственная (или временная) эволюция приводит к образованию разрыва. Мы показываем, что учет влияния космических лучей приводит к появлению характеристической (критической) длины, зависящей от амплитуды волны. Если длина волны превышает критическую, то эта волна затухает без образования разрыва. Короткие волны опрокидываются также как и в классической газовой динамике (правда, в процессе эволюции амплитуды волн уменьшаются из-за диффузии). Результаты данного исследования могут представлять интерес при исследовании крупномасштабных движений во внешних областях гелиосферы, в межзвездной и межгалактической средах.

**Глава 2** посвящена исследованию устойчивости течения плазмы перед фронтом магнитогидродинамической ударной волны с учетом

динамического влияния космических лучей и с учетом всех членов тензора пространственной диффузии (Чалов, 1988, 1990; Chalov, 1988, 1990b).

Согласно современным представлениям ускорение космических лучей происходит главным образом вблизи фронтов ударных волны (см., например, обзор Бережко и Крымского (1988)). Частицы, ускоренные на ударном фронте, конвективно сносятся вниз по потоку, однако некоторая доля этих частиц благодаря пространственной диффузии проникает в область набегающего потока. Воздействие ускоренных частиц на течение тепловой плазмы перед фронтом ударной волны благодаря наличию градиента давления частиц приводит к его торможению. В результате перед фронтом образуется область плавного изменения параметров течения - предфронт.

В работе Dorfi & Drury (1985) в рамках линейного приближения было показано, что течение плазмы с космическими лучами перед фронтом ударной волны (т.е. в предфронте) с достаточно большим числом Маха неустойчиво по отношению к звуковым колебаниям (крупномасштабное магнитное поле в этих работах не учитывалось). Влияние крупномасштабного магнитного поля на устойчивость течения в предфронте исследовалось в работах Бережко (1986) и Чалова (1988), однако только для случая параллельной ударной волны (магнитное поле параллельно вектору нормали к ударной волне). При этом эффекты, связанные с недиагональными членами тензора диффузии не учитывались. Развитие неустойчивостей перед фронтами ударных волн приводит к уменьшению пространственного коэффициента диффузии и, как следствие, к увеличению эффективности ускорения космических лучей. Например, Бережко (1986) отмечает, что при наличии магнитного поля неустойчивость может приводить к образованию магнитных пробок в области предфронта. Это обстоятельство приводит к увеличению максимально достижимой энергии космических лучей в ударной волне.

В данной главе методом малых возмущений проводится детальное исследование устойчивости предфронта ударной волны с космическими лучами для произвольного угла наклона магнитного поля к ударному фронту и с учетом недиагональных членов тензора диффузии. Анализируется устойчивость предфронта гелиосферной ударной волны. Основное течение и возмущения описываются уравнениями двухжидкостной магнитной гидродинамики (2) для плазмы с космическими лучами. Предполагается, что характерный масштаб возмущений мал по сравнению с размером предфронта. Решение разлагается в ряд по малому параметру, и в итоге для плотности волнового действия получается эволюционное уравнение, в правую часть которого входит инкремент неустойчивости, пропорциональный градиенту давления космических лучей в предфронте.

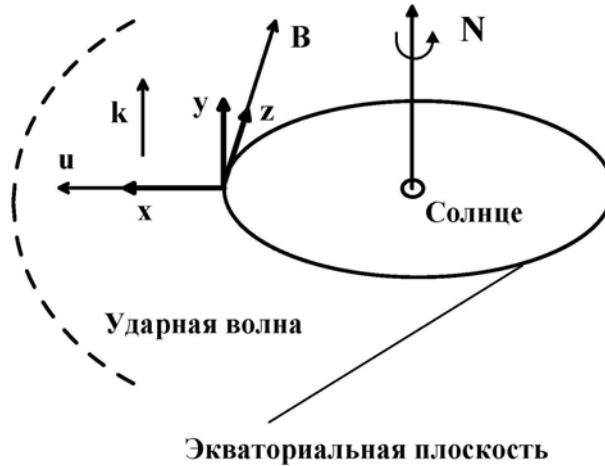


Рис.2. Схематическое изображение экваториальной области солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны. Показана используемая декартова система координат.

Анализ эволюционного уравнения показывает, что течение плазмы перед фронтом достаточно сильной магнитогидродинамической ударной волны, модифицированной динамическим воздействием космических лучей, неустойчиво по отношению к быстрым магнитозвуковым колебаниям. Если магнитное поле достаточно сильное, так что продольный коэффициент диффузии намного больше поперечного ( $\kappa_{\parallel} \gg \kappa_{\perp}$ ), то неустойчивые волны с наибольшими инкрементами распространяются под углом к вектору магнитного поля. Для квазиперпендикулярной ударной волны наиболее неустойчивые магнитозвуковые волны распространяются перпендикулярно плоскости образованной вектором индукции магнитного поля  $\mathbf{B}$  и вектором скорости плазмы  $\mathbf{u}$  (в системе координат, движущейся вместе с плазмой). При этом инкременты неустойчивости определяются недиагональными членами тензора диффузии, которые описывают дрейфовое движение энергичных частиц. В случае гелиосферной ударной волны в области низких гелиоширот волны с наибольшими инкрементами распространяются перпендикулярно к плоскости эклиптики (рис.2). При этом для компонент возмущений скорости солнечного ветра и магнитного поля справедливы следующие соотношения:

$$\tilde{u}_x = 0, \quad \tilde{u}_y \propto \tilde{\rho}, \quad \tilde{u}_z = 0, \quad \tilde{B}_x = 0, \quad \tilde{B}_y = 0, \quad \tilde{B}_z \propto \tilde{\rho}, \quad (3)$$

где  $\rho$  - возмущение плотности плазмы солнечного ветра.

Интересно, что направление распространения неустойчивых волн зависит от знака полярности солнечного магнитного поля. Так как в северном и южном полушариях направления магнитного поля различны (наиболее четко это проявляется в периоды минимумов солнечной активности), то различны и направления распространения неустойчивых волн: в обоих полушариях в приэкваториальных областях неустойчивые



волны распространяются одновременно или по направлению к плоскости экватора, или от плоскости экватора в области более высоких широт (северной и южной). Если в северном полушарии магнитное поле направлено к Солнцу (как в 1986-1987 годах), неустойчивые волны



*Рис.3. Меридиональное сечение гелиосферы. Схематически изображены направления солнечного магнитного поля и направления распространения неустойчивых магнитозвуковых волн с наибольшими инкрементами в периоды минимума солнечной активности в 1975 и 1986 годах.*

распространяются по направлению к экваториальной плоскости, если же от Солнца - по направлению от этой плоскости (см. рис.3). Таким образом, в период минимума солнечной активности 1986/1987 приэкваториальная область солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны должна быть турбулизована сильнее, чем в предыдущий (1975). В соответствии с этим следует ожидать, что в период 1986/1987 и условия для ускорения частиц на ударной волне и в ее окрестности были более благоприятные (из-за уменьшения пространственного коэффициенты диффузии и увеличения коэффициента диффузии по энергиям).

**В главе 3** исследуется влияние давления космических лучей на неустойчивость тангенциального разрыва скорости плазмы (Chalov, 1991, 1994а, 1996а).

Сдвиговые течения космической плазмы наблюдаются в различных астрофизических объектах. Границы между магнитосферами планет и солнечным ветром, между солнечным ветром и межзвездной средой, между галактическими струями и окружающей средой можно рассматривать как поверхности тангенциального разрыва скорости плазмы. В классической газовой динамике тангенциальный разрыв неустойчив (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца). При определенных условиях неустойчивость пропадает при наличии магнитного поля. В данной главе исследуется влияние дополнительной диффузионной компоненты (газа космических лучей) на линейную устойчивость тангенциального разрыва. Исследование проводится в рамках

двухжидкостной гидродинамики (2). Крупномасштабное магнитное поле не учитывается.

На основе решения линеаризованной системы основных уравнений и сшивки решений для возмущений на разрыве получается дисперсионное уравнение для частот колебаний поверхности тангенциального разрыва. Параллельно демонстрируются некоторые интересные свойства линейных волн в такой двухкомпонентной среде.

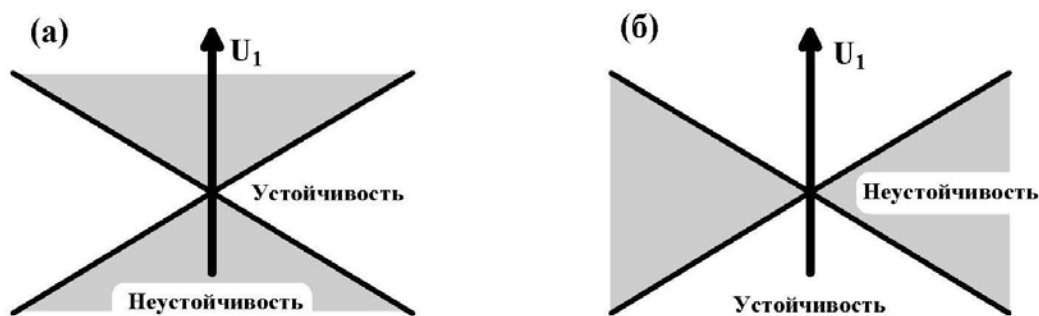


Рис.4. Области неустойчивости (затененные) в плоскости тангенциального разрыва при больших значениях числа Маха в случае (а) плазмы с космическими лучами и (б) классической газовой динамики.

Показано, что в смеси тепловой плазмы и газа космических лучей появляется новая неустойчивая мода колебаний тангенциального разрыва, которая в чисто газодинамическом случае является нейтральной. В некотором смысле она аналогична неустойчивой моде, которая появляется в гидродинамических сдвиговых течениях при учете слабой диссипации. Свойства новой моды (мы называем ее центральной) существенно отличаются от свойств классической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Основное отличие состоит в том, что, например, в случае сверхзвукового течения с большим числом Маха волновые векторы новых неустойчивых колебаний на поверхности разрыва лежат в угловых секторах, содержащих вектор относительной скорости плазмы (рис.4а). В классической же неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в этом случае неустойчивые волны распространяются почти под прямым углом к вектору относительной скорости (рис.4б).

В длинноволновом приближении (характерная длина определяется отношением коэффициента диффузии к скорости звука) доминирующей неустойчивой модой является центральная мода, а в области коротких волн - классическая мода. Увеличение давления космических лучей приводит к увеличению инкрементов центральной моды.

В реальных астрофизических объектах, например, в окрестности гелиопаузы, работают определенные механизмы диссипации, которые, разумеется, не ограничиваются рассмотренной здесь пространственной диффузией энергичных частиц. Эта диффузия в рамках двухжидкостного

приближения является крупномасштабным процессом – она не оказывает влияния на распространение коротковолновых возмущений. Для коротких волн, однако, существенны такие эффекты, как, например, вязкость и теплопроводность (молекулярные или аномальные), которые "обрезают" сверху инкременты К-Г неустойчивости (они, напомним, стремятся к бесконечности при  $k \rightarrow \infty$ ). Таким образом, если говорить о реальных объектах, приведенные здесь результаты справедливы применительно к достаточно большим характерным размерам, когда мелкомасштабной диссипацией можно пренебречь. К сожалению, в настоящее время практически отсутствуют какие-либо теоретические представления и экспериментальные данные относительно свойств плазмы солнечного ветра и межзвездной среды в окрестности гелиопаузы. Это обстоятельство не позволяет найти границу (нижнюю по пространственным масштабам), определяющую область применимости двухжидкостной модели. Однако есть основания надеяться, что после состоявшегося пересечения гелиосферной ударной волны аппаратами Voyager1/2 и их переходом в область внутреннего ударного слоя, расположенного между ударной волной и гелиопаузой, окрестность гелиопаузы станет объектом пристального внимания исследователей.

Аналитически устойчивость тангенциальных разрывов исследовалась главным образом для плоских случаев. Во второй части главы исследуется влияние кривизны на линейную неустойчивость тангенциального разрыва применительно к гелиопаузе. Эффект космических лучей не учитывается. Для решения задачи используется коротковолновое приближение, т.е. предполагается, что характерный масштаб возмущений мал по сравнению с радиусом кривизны гелиопаузы. Рассматриваются осесимметричные возмущения (ось симметрии направлена вдоль скорости потока межзвездной среды). Отметим, что используемое нами приближение несправедливо в малой окрестности критической точки (или точке торможения). Для исследования эффектов кривизны гелиопаузы выбирается единственная из имеющихся аналитических моделей взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой (Parker, 1961), более или менее адекватно описывающая качественную картину течения вблизи гелиопаузы. Модель основана на взаимодействии двух потоков несжимаемой жидкости: однородного плоско-параллельного потока и течения от сферически-симметричного источника. Поскольку рассматривается несжимаемая жидкость, то результаты анализа применимы, строго говоря, только к лобовой части реальной гелиопаузы, где скорости течения малы. Возмущения считаются потенциальными. Получено эволюционное уравнение для амплитуды возмущения поверхности гелиопаузы, из которого следует, что в ее лобовой области (до углов  $\approx 90^\circ$  от оси симметрии) кривизна играет стабилизирующую роль.

**В главе 4** сначала рассматриваются основные свойства ударных волн, модифицированных воздействием аномальной компоненты космических лучей на основе одномерного (плоского) приближения, а затем проводится исследование влияния АКЛ на структуру области взаимодействия солнечного ветра с частично ионизованной межзвездной средой в двухмерной осесимметричной постановке (Alexashov et al., 2004; Chalov & Fahr, 1994b, 1995a, 1995b, 1996b, 1997a; Myasnikov et al., 2000a, 2000b). Результаты одномерной модели используются для физического объяснения результатов, полученных в рамках более сложной двухмерной модели. Рассматривается только протонная компонента.

Динамика плазмы и АКЛ описывается двухжидкостной системой уравнений. От системы (2) она отличается, во-первых, тем, что в правую часть уравнения для давления космических лучей входит источник (для давления плазмы – сток)  $Q \propto -\alpha p_g \nabla \cdot \mathbf{u}$ , описывающий «инжекцию» тепловых протонов в АКЛ вблизи фронта гелиосферной ударной волны. Во-вторых, в уравнения неразрывности, движения и энергии входят источники, связанные с ионизацией межзвездных атомов водорода (перезарядка, фотоионизация или ионизация электронным ударом). Движение атомов описывается кинетическим уравнением для функции распределения по скоростям.

В данной главе показано, что АКЛ, как дополнительная динамическая компонента энергичных заряженных частиц в гелиосфере, может существенно влиять на свойства солнечного ветра в области его взаимодействия с межзвездной средой. Степень этого влияния зависит от многих параметров, например, от интенсивности «инъекции» тепловых частиц в режим регулярного или диффузионного ускорения на ударной волне (параметр  $\alpha$ ) и от уровня турбулентности солнечного ветра (от коэффициента пространственной диффузии  $\kappa$ ). В этой главе, главным образом, исследовались эффекты вариации коэффициента диффузии. Основные выводы можно сформулировать следующим образом:

1. Влияние АКЛ на течение солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны приводит к образованию перед ее фронтом гладкой области торможения (предфронта) и к смещению фронта (скачка или разрыва) в направлении от Солнца. Интенсивность скачка и величина смещения зависят от коэффициента пространственной диффузии: наибольшее смещение (около 4 а.е.) реализуется при промежуточных значениях  $\kappa$  (в работе рассматривался интервал  $3.75 \times 10^{20} \text{ см}^2 / \text{с} \leq \kappa \leq 3.75 \times 10^{22} \text{ см}^2 / \text{с}$ ).

2. Влияние АКЛ приводит к ослаблению интенсивности скачка параметров на ударном фронте и, следовательно, к уменьшению температуры за фронтом гелиосферной ударной волны. Уменьшение температуры во внутреннем ударном слое может приводит к уменьшению концентрации атомов водорода, которые образуются в области между

ударной волной и гелиопаузой (Alexashov et al., 2004). Этот результат очень важен для интерпретации измерений потоков энергичных атомов из внешних областей гелиосферы на SOHO/CELIAS (Hilchenbach et al., 1998) и планируемых измерений в рамках проекта IBEX.

3. Давление АКЛ за фронтом гелиосферной ударной волны сравнимо с давлением тепловой плазмы в случае малых  $k$ , когда диффузионная длина мала по сравнению с расстоянием от Солнца до ударной волны. С другой стороны, при больших  $k$  давление АКЛ за фронтом ударной волны пренебрежимо мало. Наши расчеты показывают, что давление (плотность энергии) АКЛ вблизи ударной волны в направлении на набегающий поток межзвездной среды превышает давление АКЛ в хвостовом направлении. Эта асимметрия (в нашей модели) связана с зависимостью плотности внутренней энергии солнечного ветра от расстояния и, как следствие, с зависимостью от расстояния интенсивности инжекции.

**В главе 5** проводятся детальные исследования процессов переноса захваченных межзвездных ионов в солнечном ветре на основе численного решения кинетического диффузионного уравнения, которое описывает все основные физические процессы: образование захваченных ионов, их конвективный перенос, адиабатическое охлаждение в расширяющемся солнечном ветре, адиабатическую фокусировку в неоднородном магнитном поле, рассеяние по питч-углам и диффузию в пространстве энергий (Чалов и Фар, 2006а; Chalov & Fahr, 1998, 1999а, 1999b, 2000b, 2002; Chalov, 2006b; Gloeckler et al., 2004; Möbius et al., 2004).

Уравнение для гиротропной функции распределения захваченных ионов  $f(t, \mathbf{r}, v, \mu)$  в сферической системе координат можно записать в виде (Chalov, 2006b):

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + (V_{SW} + v\mu\chi) \frac{\partial f}{\partial r} - \frac{v\mu(1-\chi^2)^{1/2}}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} + \left[ \frac{1-3\mu^2}{2} \frac{1-\chi^2}{r} - \frac{1-\mu^2}{r} \right] V_{SW} v \frac{\partial f}{\partial v} + \\ + \frac{1-\mu^2}{2} \left[ \frac{v}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 \chi) + \frac{2V_{SW}}{r} \mu - 3\mu V_{SW} \frac{1-\chi^2}{r} \right] \frac{\partial f}{\partial \mu} = \hat{S}f + Q(r, \theta, \varphi, v, \mu). \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнении (4)  $V_{SW}$  - скорость солнечного ветра,  $v$  и  $\mu = \cos \xi$  - модуль скорости и косинус питч-угла заряженной частицы в подвижной системе координат,  $\chi = \cos \psi$ ,  $\psi(r, \theta)$  - угол между векторами скорости  $\mathbf{V}_{SW}$  и магнитного поля  $\mathbf{B}$ ,  $\hat{S}$  - дифференциальный оператор рассеяния и  $Q$  - источник захваченных ионов. Оператор  $\hat{S}$  описывает рассеяние заряженных частиц по питч-углу и энергетическую диффузию и вычисляется в рамках квазилинейной теории резонансного взаимодействия частиц с волнами (см., например, Schlickeiser, 1989). Уравнение (4) является уравнением Фоккера-Планка (тип этого уравнения определяется

функциональным видом оператора рассеяния). Для решения уравнения (4) использовалась теорема об эквивалентности уравнений типа Фоккера-Планка системе обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений. В главе 5 приводится метод перехода от одного типа описания процессов переноса захваченных ионов к другому типу описания. Предложенный в работе метод решения уравнения (4) позволил впервые теоретически исследовать процесс распространения захваченных ионов в солнечном ветре с одновременным учетом всех основных физических эффектов.

Одна из задач, рассматриваемых в главе, состоит в исследовании на основе уравнения (4) временной эволюции скоростной функции распределения захваченных протонов, инжектируемых в начальный момент на сферической поверхности с радиусом  $r_E$ . Задача представляет скорее академический интерес, но она позволяет глубже понять основные свойства анизотропного распределения захваченных ионов. Показывается, например, что в случае слабого рассеяния, средняя (массовая) скорость захваченных ионов меньше скорости солнечного ветра, так что фиксированный объем, занятый этими ионами, отстает от объема, занятого плазмой солнечного ветра. Этот вывод справедлив, правда, только во внутренних областях гелиосферы, где радиальная компонента межпланетного магнитного поля не мала.

Другая задача связана со свойствами захваченных ионов гелия. Поскольку для атомов гелия сила радиационного давления пренебрежимо мала по сравнению с силой солнечной гравитации, их динамика в гелиосфере полностью определяется действием последней. Наиболее ярким проявлением солнечного притяжения является эффект гравитационной фокусировки атомов гелия, приводящий к формированию области с повышенной концентрацией атомов – гравитационного гелиевого конуса. Относительно Солнца эта область располагается в противоположной от набегающего потока межзвездной среды стороне. Ионизация межзвездного гелия (главным образом за счет фотоионизации) приводит к образованию захваченных ионов гелия. Так как локальная скорость рождения захваченных ионов пропорциональна концентрации атомов, то наряду с гравитационным конусом, состоящим из атомов гелия, должна существовать аналогичная структура, состоящая из захваченных ионов гелия, причем следовало бы ожидать, что положения максимумов концентрации и геометрические размеры у обеих структур одинаковые. Однако, как было отмечено в работе Möbius et al. (1995), отклонение скоростного распределения захваченных ионов от изотропного может приводить к увеличению ширины конуса (вследствие диффузии) и к относительному смещению заряженного и нейтрального гелиевых конусов. В настоящей главе проводится детальное исследование этих эффектов на основе численного решения уравнения (4).

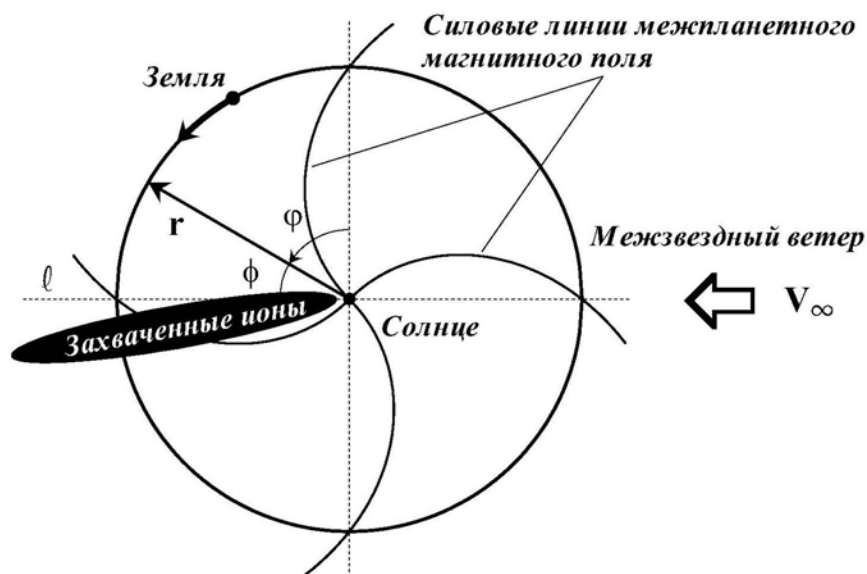


Рис.5. Схематическое изображение гравитационного конуса, состоящего из захваченных ионов гелия, в плоскости эклиптики. Линия  $l$  совпадает с осью симметрии атомарного гелиевого конуса.

В начальный момент в подвижной системе координат движение ионов, образующихся в области гравитационного конуса, складывается из циклотронного вращения и перемещения вдоль силовой линии спирального магнитного поля по направлению к Солнцу. Взаимодействие ионов с флуктуациями приводит к их рассеянию по питч-углу, однако в случае анизотропного распределения количество ионов, движущихся к Солнцу, превышает количество ионов, движущихся в противоположном направлении. Это обстоятельство приводит к систематическому смещению (в плоскости эклиптики) гравитационного конуса, состоящего из захваченных ионов, относительно вектора скорости межзвездного ветра в направлении вращения Земли вокруг Солнца (рис. 5). На рис. 5 линия  $l$  совпадает с осью симметрии атомарного гелиевого конуса (на рисунке не показан). Величина углового смещения конуса зависит от уровня турбулентности солнечного ветра (или длины свободного пробега ионов). При высоком уровне турбулентности, когда функция распределения ионов по скоростям изотропна, смещение отсутствует. Систематические измерения потоков захваченных ионов гелия прибором SWICS, установленным на космическом аппарате ACE, зафиксировали пять прохождений гравитационного конуса в период с 1998 по 2002 год. Тем не менее, никаких заметных пространственных отклонений максимумов этих потоков от направления средней скорости межзвездных атомов гелия обнаружено не было (Gloeckler et al., 2004). Физически эти измерения можно было бы объяснить изотропией распределения захваченных ионов гелия по скоростям. В настоящей главе, однако, показывается, что

совпадение максимумов концентраций захваченных ионов и атомов связано с тем обстоятельством, что интерпретация результатов измерений на приборе SWICS проводится на основе только части захваченных ионов, имеющих достаточно большие скорости относительно аппарата.

**В главе 6** исследуются процессы ускорения захваченных ионов в сверхзвуковом солнечном ветре, во внутреннем ударном слое и на гелиосферной ударной волне (Chalov, 1993, 2000a, 2001b, 2005, 2006b; Chalov & Fahr, 1996c, 1999b, 2000c, 2001a, 2003b; Chalov et al., 1995c, 1997b, 2003a, 2004b, 2007; Kallenbach, 2004, 2005; Malama et al., 2005, 2006).

В разделе 6.2 исследуется стохастическое ускорение захваченных ионов в сверхзвуковом солнечном ветре в результате их взаимодействия с мелкомасштабной альвеновской и крупномасштабной магнитозвуковой турбулентностью. Процесс ускорения описывается диффузионным уравнением для функции распределения ионов, осредненной по питч-углам:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{V}_{SW} \frac{\partial F}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} \left( v^2 D \frac{\partial F}{\partial v} \right) + \frac{v}{3} \frac{\partial F}{\partial v} \operatorname{div} \mathbf{V}_{SW} + Q(\mathbf{r}, v) + S(\mathbf{r}, v). \quad (5)$$

В уравнении (5)  $D(\mathbf{r}, v)$  - энергетический коэффициент диффузии,  $Q(\mathbf{r}, v)$  - источник захваченных ионов. Член  $S(\mathbf{r}, v)$  - описывает перезарядку между захваченными ионами и межзвездными атомами. В области до гелиосферной ударной волны этим членом можно пренебречь, однако он важен в области между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой. Коэффициент диффузии, зависящий от параметров турбулентности солнечного ветра, вычисляется в рамках квазилинейной теории. Исследование процесса ускорения захваченных ионов во внешней гелиосфере представляет большой интерес, поскольку он может рассматриваться как некое предварительное ускорение ионов, необходимое для их дальнейшего ускорения на гелиосферной ударной волне до энергий АКЛ. В данном разделе вычисляются спектры захваченных протонов перед фронтом гелиосферной ударной волны для различных значений параметров, характеризующих турбулентность солнечного ветра.

В разделе 6.3 исследуется процесс дрейфового ускорения захваченных протонов на гелиосферной ударной волне. Захваченные протоны рождаются повсюду в гелиосфере и подвергаются стохастическому ускорению, взаимодействуя с флуктуациями солнечного ветра. Когда протоны достигают гелиосферной ударной волны, частицы из высокоскоростных "хвостов" в их скоростных распределениях испытывают отражения от фронта (в результате скачка магнитного поля), приобретая при этом энергию вследствие дрейфового движения вдоль индуцированного электрического поля. Для описания взаимодействия

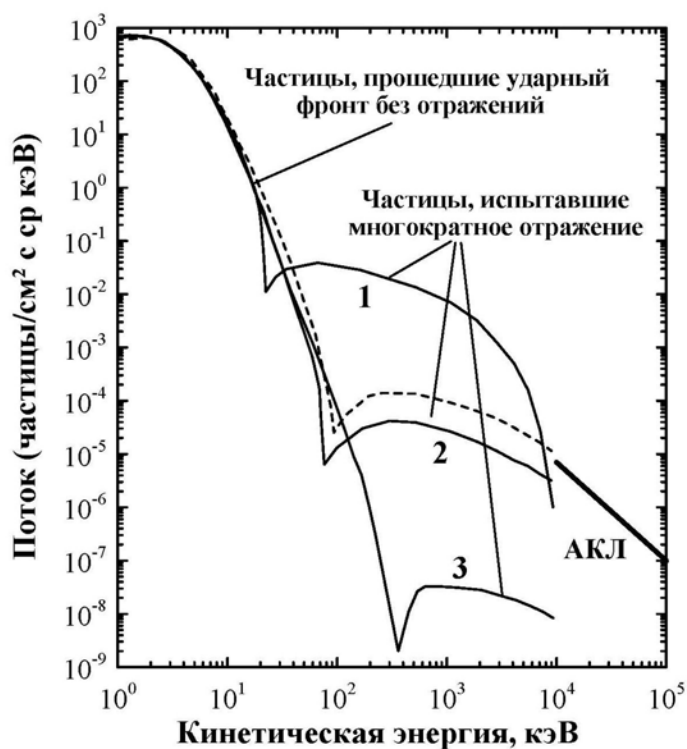


заряженной частицы с ударным фронтом используется адиабатическая теория (не учитываются процессы рассеяния за промежуток времени, в течении которого это взаимодействие происходит). Ударный фронт считается магнитогидродинамическим разрывом. Пренебрежение рассеянием при взаимодействии протонов с фронтом является достаточно хорошим приближением для квазиперпендикулярных ударных волн в случае, когда их гирорадиус много меньше длины свободного пробега (слабое рассеяние). Однако в областях перед ударным фронтом и за ним, где частицы проводят сравнительно большое время, эффекты рассеяния по питч-углам учитываются. Именно это рассеяние позволяет отраженным частицам или частицам, прошедшим через фронт, снова вернуться к нему. Движение захваченных протонов в области перед фронтом и за ним описывается уравнением (4).

Так как гирорадиус типичного захваченного протона во внешней гелиосфере на несколько порядков превышает гирорадиусы протонов солнечного ветра, а толщина фронта ударной волны не более нескольких гирорадиусов протонов солнечного ветра, то при взаимодействии захваченных протонов с гелиосферной ударной волной последнюю можно рассматривать как разрыв. В этом случае условия отражения частицы от фронта могут быть получены из сохранения ее энергии в системе координат Хоффмана-Теллера и из предположения о том, что магнитный момент этой частицы тот же самый до и после взаимодействия с фронтом, т.е. является адиабатическим инвариантом. Важно, что характер взаимодействия энергичных заряженных частиц с фронтом ударной волны существенно зависит от ориентации магнитного поля относительно фронта.

Рассчитанные спектры захваченных протонов за фронтом гелиосферной ударной волны показаны на рис.6. Здесь необходимо отметить одно важное обстоятельство. Если бы гелиосферная ударная волна была сферически-симметричной и центр симметрии совпадал с положением Солнца, тогда межпланетное магнитное поле было бы почти перпендикулярным к нормали ударного фронта всюду за исключением полярных областей. Именно такая геометрия и рассматривается в литературе, когда речь идет об ускорении энергичных частиц на ударной волне. Однако, реальная гелиосферная ударная волна асимметрична из-за динамического воздействия набегающей на солнечную систему межзвездной среды. Из результатов численного моделирования (Vaganov & Malama, 1993) следует, что ударная волна является почти сферически-симметричной, однако центр сферы смещен относительно положения Солнца в направлении вектора скорости межзвездной среды. Это обстоятельство имеет важное следствие: величина угла  $\Psi$  между направлением магнитного поля и нормалью к фронту различна в различных точках фронта. А именно, эта величина зависит от угла между

вектором скорости межзвездной среды (или осью симметрии в двумерной задаче о взаимодействии солнечного ветра с межзвездной средой) и направлением на данную точку фронта. Если в лобовой и хвостовой частях ударной волны она является перпендикулярной, то во флангах угол  $\Psi$  может уменьшаться до  $70^\circ$ . Таким образом, условия отражения от фронта, а значит и эффективность дрейфового ускорения сильно зависят от расположения данной области на фронте. Этот важный факт неоднократно отмечался в наших работах.



*Рис.6. Дифференциальные потоки захваченных протонов за фронтом ударной волны в системе координат, связанной с солнечным ветром, для различных значений угла  $\Psi$ : 1-  $\Psi = 70^\circ$ , 2 -  $\Psi = 80^\circ$ , 3 -  $\Psi = 85^\circ$ . Штриховая линия соответствует более высокому уровню турбулентности солнечного ветра. Сплошная жирная линия - теоретический спектр АКЛ (протоны) на гелиосферной ударной волне, полученный на основе экстраполяции измерений в сверхзвуковом солнечном ветре (Cummings & Stone, 1996).*

В разделе 6.4 впервые исследуются пространственные и энергетические распределения захваченных протонов во внутреннем ударном слое. Показывается, что энергетические спектры захваченных протонов во внутреннем ударном слое существенно отличается от спектров в области сверхзвукового солнечного ветра (от Солнца до гелиосферной ударной волны). Спектры в ударном слое являются более сложными из-за

появления спектральных провалов, связанных с перезарядкой захваченных протонов и межзвездных атомов. Наиболее важным эффектом является формирование высокоскоростных "хвостов" в спектрах даже при относительно низком уровне турбулентности.

В разделе 6.5 проводятся оценки эффективности стохастического ускорения заряженных частиц в гелиосферном ударном слое и роль этого ускорения в происхождении аномальной компоненты космических лучей. Показано, что лобовая область внутреннего ударного слоя является идеальным местом для стохастического ускорения. Даже при относительно низком уровне турбулентности солнечного ветра ионы могут ускоряться до энергий порядка 10 МэВ/нуклон. Этот вывод основан на двух обстоятельствах. Во-первых, характерные времена, в течение которых солнечный ветер движется в этой области и, следовательно, энергичные частицы подвергаются ускорению, составляют несколько десятков лет (время движения солнечного ветра от Солнца до гелиосферной ударной волны около года). Во-вторых, дивергенция скорости солнечного ветра в этой области отрицательная. Другими словами, вместо адиабатического охлаждения частиц, характерного для расширяющегося сверхзвукового солнечного ветра, в ударном слое частицы испытывают адиабатический нагрев.

В разделе 6.6 рассматривается образование энергичных нейтральных атомов в результате перезарядки первичных межзвездных атомов и захваченных протонов во внутреннем ударном слое, а также роль этих атомов в формировании высокоскоростных «хвостов» в распределении захваченных протонов во внутренней гелиосфере. Показано, что такие «хвосты», измеряемые на космическом аппарате Ulysses и ACE в спокойном солнечном ветре, когда эффективность стохастического ускорения мала, могут образовываться из-за ионизации энергичных атомов.

**Глава 7** посвящена вопросу нагрева протонов солнечного ветра на больших расстояниях от Солнца (Чалов и др., 2006б; Chalov et al., 2004а, 2006а).

Измерения параметров солнечного ветра на космическом аппарате Voyager 2 показывают, что пространственное поведение температуры протонов существенно отличается от адиабатического (Richardson & Smith, 2003). Примерно до 25 а.е. от Солнца температура падает, но гораздо медленнее, чем в адиабатически расширяющемся потоке, а начиная с 25 а.е. наблюдается ее рост. Такое необычное поведение температуры свидетельствует о том, что существуют определенные механизмы нагрева солнечного ветра. Согласно современным представлениям основным источником нагрева солнечных протонов до расстояний порядка 10 а.е. являются межпланетные ударные волны и диссипация турбулентных флуктуаций, возникающих в результате развития неустойчивостей в

областях, разделяющих высокоскоростные и низкоскоростные потоки солнечного ветра. На больших расстояниях от Солнца основной механизм нагрева солнечного ветра связывают с захваченными протонами, рождающимися в гелиосфере в результате ионизации межзвездных атомов водорода (Williams et al., 1995; Chashei et al., 2003).

Межзвездные атомы, проникающие в гелиосферу, ионизируются главным образом вследствие перезарядки с протонами солнечного ветра и под действием солнечного излучения. Рождающиеся в результате этих процессов ионы захватываются межпланетным магнитным полем, вмороженным в солнечный ветер. В системе координат, связанной с солнечным ветром, скорости вновь образовавшихся ионов приблизительно равны локальной скорости ветра, а их распределение по питч-углам является сильно анизотропным. Такое распределение неустойчиво и быстро (по сравнению с процессом конвективного переноса) эволюционирует в бисферическое распределение, близкое к изотропному (Galeev & Sagdeev 1988). Плотность энергии частиц при бисферическом распределении меньше плотности энергии, которую частицы имели в начальный момент. При этом «свободная энергия» первоначального анизотропного распределения (разность энергиями неустойчивого скоростного распределения частиц и устойчивого распределения, близкого к изотропному) расходуется на генерацию альвеновских волн. Диссипация этих волн вследствие циклотронно-резонансного взаимодействия с протонами солнечного ветра рассматривается в качестве основного источника разогрева протонов во внешних областях гелиосферы. Важно отметить, что этот механизм эффективен именно во внешней гелиосфере ( $\geq 10$  а.е.), где концентрация захваченных ионов, а значит и плотность генерируемой ими волновой энергии достаточно высоки.

Доля «свободной энергии» анизотропного распределения по порядку величины равна  $v_A/V_{SW}$  от полной энергии захваченных ионов, где  $v_A$  и  $V_{SW}$  - альвеновская скорость и скорость солнечного ветра соответственно. Однако, для того чтобы объяснить наблюдаемое пространственное распределение температуры протонов солнечного ветра, достаточно передать им лишь незначительную часть этой энергии (около 5%). Вопрос о том, почему оставшиеся 95% не вносят никакого вклада в нагрев протонов, оставался открытым достаточно длительное время.

В данной главе диссертационной работы исследуется эволюция спектральной плотности волновой энергии, генерируемой захваченными протонами, и функции распределения захваченных протонов по скоростям. Для описания плотности волновой энергии используется эволюционное уравнение, включающее член с нелинейной диффузией и член, описывающий затухание волн вследствие резонансного взаимодействия с захваченными протонами. Функция распределения захваченных протонов

описывается диффузионным уравнением (5), в котором коэффициент диффузии зависит от плотности волновой энергии.

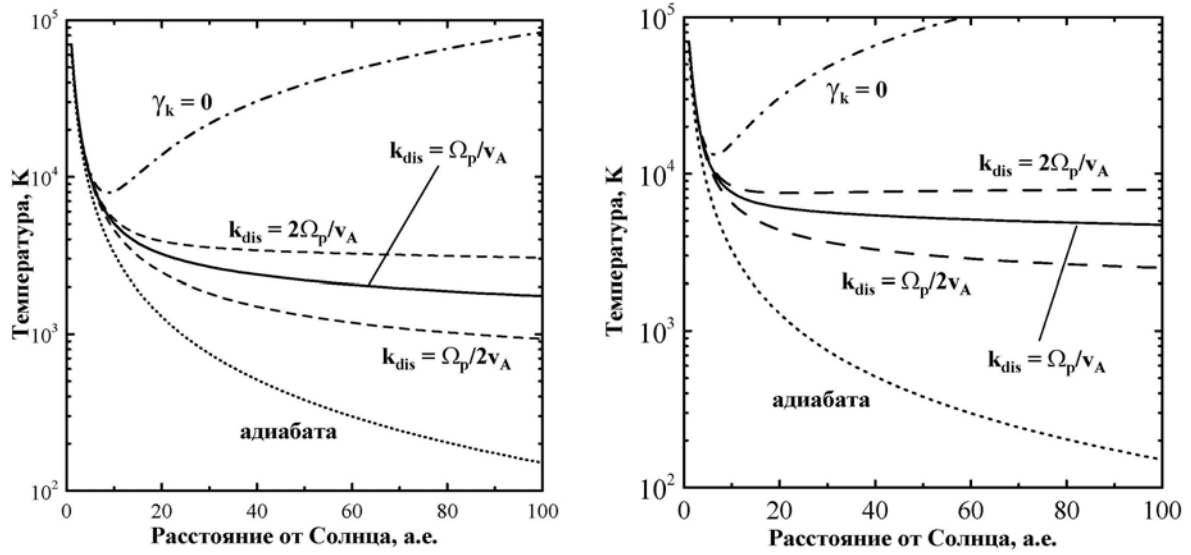


Рис.7. Пространственное распределение температуры протонов в нормальном солнечном ветре с  $V_{SW} = 450$  км/с (левый рисунок) и в высокоскоростном ветре с  $V_{SW} = 750$  км/с (правый рисунок). Пунктирные линии соответствуют адиабатически расширяющемуся потоку, штрихпунктирные - случаю, когда поглощение волновой энергии захваченными протонами отсутствует. Сплошные и штриховые линии показывают распределение температуры при различных значениях  $k_{dis}$ .

На основе численного решения этой самосогласованной системы уравнений показано, что в области больших волновых чисел основная часть энергии поглощается самими захваченными протонами, что приводит к их стохастическому ускорению (так что проблемы «95-ти процентов» не существует). Тем не менее, некоторое количество волновой энергии может передаваться протонам солнечного ветра и обеспечивать их нагрев. Для определения пространственной температуры протонов использовалась простейшая сферически-симметричная модель:

$$\frac{dT}{dr} + \frac{4T}{3r} = \frac{2}{3} \left( \frac{r}{r_E} \right)^2 \frac{\Phi(r)}{k_B V_{SW} n_{pE}}. \quad (6)$$

Источник в правой части уравнения (6) связан с волновой энергией, генерируемой захваченными протонами и передаваемой протонам солнечного ветра. Здесь  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $n_{pE}$  - концентрация протонов на орбите Земли, а  $\Phi(r)$  - диффузионный поток энергии, переносимой в область больших значений волновых чисел, где энергия полностью диссипирует. В качестве волнового числа, разделяющего

инерционную и диссипативную области в спектре турбулентности солнечного ветра, принимается  $k_{dis} = \Omega_p / v_A$  (Leamon et al., 1998), где  $\Omega_p$  - ларморовская частота протонов. Поток  $\Phi$  находится в результате решения описанной выше замкнутой системы уравнений для плотности волновой энергии и функции распределения захваченных протонов. Найденные распределения температуры показаны на рис. 7. Следует отметить, однако, что температура, измеряемая во внешних областях гелиосферы, превышает температуру, рассчитанную в настоящей работе. Данное обстоятельство можно объяснить наличием дополнительного механизма нагрева, например, нагрева ударными волнами.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

В работе проводится исследование процессов ускорения и переноса энергичных заряженных частиц в гелиосфере и их влияния на течение и устойчивость плазмы солнечного ветра в области его взаимодействия с локальной межзвездной средой. В качестве энергичных заряженных частиц рассматриваются захваченные межзвездные ионы и космические лучи. Эти частицы существенно различаются по энергиям и концентрациям, однако в области гелиосферного интерфейса плотности их внутренних энергий могут быть сравнимы и они могут оказывать существенное влияние на характеристики солнечного ветра. В работе получены следующие основные результаты:

1. Исследована устойчивость течения плазмы перед фронтом магнитогидродинамической ударной волны с учетом динамического влияния космических лучей. Показано, что достаточно сильная ударная волна неустойчива по отношению к быстрым магнитозвуковым колебаниям. Если магнитное поле достаточно сильное, так что тензор пространственной диффузии является существенно анизотропным, то наиболее неустойчивые волны распространяются под углом к вектору магнитного поля. Для квазиперпендикулярных ударных волн магнитозвуковые колебания с наибольшими инкрементами распространяются перпендикулярно плоскости, образованной векторами магнитного поля и скорости плазмы (в системе координат, движущейся вместе с плазмой). При этом инкременты неустойчивости определяются недиагональными членами тензора диффузии, которые описывают дрейфовое движение энергичных частиц. В случае гелиосферной ударной волны в области низких гелиоширот волны с наибольшими инкрементами распространяются перпендикулярно плоскости эклиптики, причем направление их распространения зависит от знака полярности солнечного магнитного поля. Результаты исследования могут представлять интерес для интерпретации плазменных измерений на аппарате Voyager 2.

2. Показано, что в смеси тепловой плазмы и газа космических лучей появляется новая неустойчивая мода колебаний тангенциального разрыва скорости и плотности. В некотором смысле она аналогична неустойчивой моде, которая появляется в гидродинамических сдвиговых течениях при учете слабой диссипации. Свойства новой моды существенно отличаются от свойств классической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Например, в случае сверхзвукового течения с большим числом Маха волновые векторы новых неустойчивых колебаний на поверхности разрыва лежат в угловых секторах, содержащих вектор относительной скорости плазмы. В классической же неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в этом случае неустойчивые волны распространяются почти под прямым углом к вектору относительной скорости. Полученный результат может представлять интерес при исследовании структуры гелиопаузы, которое становится особенно актуальной в связи с тем, что аппараты Voyager 1/2 пересекли гелиосферную ударную волну и продолжают приближаться к границе гелиосферы.

3. В рамках двухмерной кинетико-газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с частично ионизованной локальной межзвездной средой исследовано динамическое влияние аномальной компоненты космических лучей на структуру области взаимодействия, интенсивность и положение гелиосферной и головной ударных волн. Показано, что включение в модель аномальной компоненты приводит к увеличению гелиоцентрического расстояния до гелиосферной ударной волны (на несколько астрономических единиц) и к понижению температуры солнечного ветра в области внутреннего ударного слоя.

4. Детально исследован процесс переноса захваченных межзвездных ионов в солнечном ветре на основе численного решения кинетического диффузионного уравнения, описывающего все основные физические процессы: образование захваченных ионов, их конвективный перенос, адиабатическое охлаждение в расширяющемся солнечном ветре, адиабатическую фокусировку в неоднородном магнитном поле, рассеяние по питч-углам, диффузию в пространстве энергий. Для решения диффузионного уравнения использовалась его эквивалентность системе обыкновенных стохастических дифференциальных уравнений. Показано, в частности, что начальная анизотропия функции распределения захваченных ионов гелия в области солнечного гравитационного конуса приводит к угловому смещению (в плоскости эклиптики) пространственного распределения ионов относительно гравитационного конуса, состоящего из атомов гелия, в направлении вращения Земли вокруг Солнца. Величина смещения зависит от уровня турбулентности солнечного ветра (или длины свободного пробега ионов). Отсутствие подобного смещения в измерениях на аппарате ACE связано с тем обстоятельством, что установленный на нем прибор SWICS регистрирует и

идентифицирует только часть ионов с определенными величинами и направлениями скоростей.

5. Показано, что пространственная асимметрия гелиосферной ударной волны, возникающая вследствие воздействия на солнечный ветер набегающего потока межзвездной среды, приводит к тому, что эффективность дрейфового ускорения захваченных ионов на ударной волне существенно зависит от углового положения области ускорения относительно вектора скорости межзвездной среды. Это обстоятельство объясняется изменением вдоль фронта волны угла между вектором межпланетного магнитного поля и нормалью к фронту. Таким образом, эффективность ускорения в интервале энергий от нескольких десятков кэВ до нескольких МэВ оказывается наиболее высокой вблизи флангов ударной волны, где она является квазиперпендикулярной. Данный результат использовался для интерпретации измерений потоков энергичных заряженных частиц на аппарате Voyager 1.

6. Впервые исследованы энергетические и пространственные распределения захваченных протонов в области внутреннего ударного слоя (между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой). Показано, что спектры захваченных протонов в этой области качественно отличаются от спектров в сверхзвуковом солнечном ветре - в них образуются провалы из-за перезарядки между захваченными протонами и межзвездными атомами водорода. Результаты исследования важны для интерпретации результатов измерений потоков энергичных нейтральных атомов из области внутреннего ударного слоя, которые будут проводиться на аппарате IBEX в 2008 г.

7. Показано, что лобовая область внутреннего ударного слоя является идеальным местом для стохастического ускорения заряженных энергичных частиц. Даже при относительно низком уровне турбулентности солнечного ветра ионы могут ускоряться до энергий порядка 10 МэВ/нуклон. Этот вывод основан на двух обстоятельствах. Во-первых, характерные времена, в течение которых солнечный ветер движется в этой области и, следовательно, энергичные частицы подвергаются ускорению, составляют несколько десятков лет (время движения солнечного ветра от Солнца до гелиосферной ударной волны около года). Во-вторых, дивергенция скорости солнечного ветра в этой области отрицательная. Другими словами, вместо адиабатического охлаждения частиц, характерного для расширяющегося сверхзвукового солнечного ветра, в ударном слое частицы испытывают адиабатический нагрев. Данный результат может быть использован для объяснения необычного пространственного поведения потоков аномальной компоненты космических лучей, измеряемых на аппарате Voyager 1 в момент пересечения гелиосферной ударной волны и после ее пересечения.



8. Показано, что высокоскоростные «хвосты» в спектрах захваченных протонов, измеряемые на космических аппаратах Ulysses и ACE в спокойном солнечном ветре, когда эффективность стохастического ускорения мала, могут образовываться из-за ионизации энергичных атомов водорода. Эти атомы проникают в достаточно близкие к Солнцу области из внутреннего ударного слоя, где они образуются вследствие перезарядки разогретых и ускоренных захваченных протонов с межзвездными атомами водорода.

9. Во внешней гелиосфере альвеновская турбулентность в области коротких волн почти полностью обусловлена источником, связанным с неустойчивостью начального анизотропного распределения захваченных протонов. Основная доля генерируемой турбулентной энергии поглощается самими захваченными протонами в результате циклотронно-резонансного взаимодействия частиц с волнами, и лишь незначительная часть этой энергии может передаваться протонам солнечного ветра и приводить к их нагреву во внешних областях гелиосферы, наблюдаемому на аппарате Voyager 2. Поглощение турбулентной энергии захваченными протонами приводит к их ускорению, носящему стохастический характер.

#### **ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА, не вошедшая в список публикаций по теме диссертации**

1. Баранов В.Б., Краснобаев К.В., Куликовский А.Г. Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. АН СССР 1970. Т.194. С.41 – 44.
2. Бережко Е.Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами // Письма в Астрон. журн. 1986. Т.12. С.842 – 847.
3. Бережко Е.Г., Крымский Г.Ф. Ускорение космических лучей ударными волнами // УФН. 1988. Т.154. С.49 – 91.
4. Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л., Догель В.А., Птускин В.С. Астрофизика космических лучей М.: Наука, 1984. 360~с.
5. Гинзбург В.Л., Сыроватский С.И. Происхождение космических лучей. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
6. Птускин В.С. Давление газа быстрых заряженных частиц, диффундирующих в среде со стохастическим магнитным полем // ЖЭТФ 1984. Т.86. Р.483 – 486.
7. Cummings A.C., Stone E.C. Composition of anomalous cosmic rays and implications for the heliosphere // Space Sci. Rev. 1996. V.78. P.117 – 128.
8. 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.

9. *Baranov V.B., Lebedev M.G., Malama Y.G.* 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.
10. *Chashei I.V., Fahr H.J., Lay G.* Heating of distant solar wind ion species by wave energy dissipation // *Adv. Space Res.* 2003. V.32. P.507 – 512.
11. *Dorfi E.A., Drury L.O'C.* A cosmic ray driven instability // *Proc. 19th ICRC, La Jolla.* 1985. V.3. P.121 – 123.
12. *Fisk L.A.* Journey into the unknown beyond // *Science* 2005. V.309. P.2016 – 2017.
13. *Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R.* An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancements in low-energy cosmic rays // *Astrophys. J.* 1974. V.190. P.L35--L37.
14. *Galeev A.A., Sagdeev R.Z.* Alfvén waves in a space plasma and its role in the solar wind interaction with comets // *Astrophys. Space Sci.* 1988. V.144. P.427 – 438.
15. *Gloeckler G., Geiss, J., Balsiger H., et al.* Detection of interstellar pick-up hydrogen in the solar system // *Science* 1993. V.261. P.70 – 73.
16. *Hilchenbach M., Hsieh K.C., Hovestadt D. et al.* Detection of 55-80 keV hydrogen atoms of heliospheric origin by CELIAS/HSTOF on SOHO // *Astrophys. J.* 1998. V.503. P.916 – 922.
17. *Lallement R.* Relations between ISM inside and the heliosphere. // *Space Sci. Rev.* 1996. V.78. P.361-374.
18. *Leamon R.J., Smith C.W., Ness N.F., Matthaeus W.H., Wong H.K.* Observational constraints on the dynamics of the interplanetary magnetic field dissipation range // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103. P.4775 – 4787.
19. *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.
20. *Möbius E., Hovestadt D., Klecker B., et al.* Direct observations of He<sup>+</sup> pick-up ions of interstellar origin in the solar wind // *Nature* 1985. V.318. P.426 – 429.
21. *Möbius E., Rucinski D., Hovestadt D., Klecker B.* The helium parameters of the very local interstellar medium as derived from the distribution of He<sup>+</sup> pickup ions in the solar wind // *Astron. Astrophys.* 1995. V.304. P.505 – 519.
22. *Parker E.* The stellar-wind regions // *Astrophys. J.* 1961. V.134. P.20 – 27.
23. *Richardson J.D., Smith C.W.* The radial temperature profile of the solar wind // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V.30. No.5. doi:10.1029/2002GL016551.
24. *Schlickeiser R.* Cosmic-ray transport and acceleration. I. Derivation of the kinetic equation and application to cosmic rays in static cold media // *Astrophys. J.* 1989. V.336. P.243 – 263.
25. *Williams L.L., Zank G.P., Matthaeus W.H.* Dissipation of pick-up induced waves: A solar wind temperature increase in the outer heliosphere? // *J. Geophys. Res.* 1995. V.100. P.17059 – 17067.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССИРТАЦИИ

1. Чалов С.В. Неустойчивость диффузионной ударной волны в плазме с космическими лучами // Письма в Астрон. журн. 1988. Т.14. С.272 – 276.
2. Чалов С.В. Космические лучи и магнитозвуковая неустойчивость течения солнечного ветра вблизи гелиосферной ударной волны // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т.30. С.32 – 36.
3. Чалов С.В., Фар Х.Й. Захваченные ионы межзвездного гелия в области солнечного гравитационного конуса // Письма в Астрон. журн. 2006а. Т.32. С.540 – 548.
4. Чалов С.В., Алексашов Д.Б., Фар Х.Й. Межзвездные захваченные протоны и разогрев солнечного ветра во внешней гелиосфере // Письма в Астрон. журн. 2006б. Т.32. С.232 – 340.
5. 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.
6. Chalov S.V. Instability of the structure of strong oblique MHD cosmic-ray shocks // Astrophys. Space Sci. 1988. V.148. P.175 – 188.
7. Chalov S.V. The propagation of weakly nonlinear waves in a plasma including low-pressure cosmic rays // Astrophys. Space Sci. 1990а. V.164. P.183 – 191.
8. Chalov S.V. Cosmic rays and magnetosonic instabilities of solar wind flow near the heliospheric shock wave // Physics of the Outer Heliosphere. Eds. S. Grzedzielski and D.E. Page. Pergamon, New York. 1990b. P.219 – 221.
9. Chalov S.V. The effect of cosmic rays on the instability of a tangential discontinuity // J. Plasma Phys. 1991. V.46. P.309 – 317.
10. Chalov S.V. Longitudinal distribution of anomalous hydrogen near the solar wind termination shock // Planet. Space Sci. 1993. V.41. P.133 – 136.
11. Chalov S.V. The instability of a tangential discontinuity in a plasma with cosmic rays: the application to the heliopause // Planet. Space Sci. 1994а. V.42. P.55 – 62.
12. Chalov S.V., Fahr H.J. A two-fluid model of the solar wind termination shock modified by shock generated cosmic rays including energy losses // Astron. Astrophys. 1994b. V.288. P.973 – 980.
13. Chalov S.V., Fahr H.J. Entropy generation at the multi-fluid solar wind termination shock producing anomalous cosmic ray particles // Planet. Space Sci. 1995а. V.43. P.1035 – 1043.
14. Chalov S.V., Fahr H.J. The multi-fluid solar wind termination shock and its influence on the three-dimensional plasma structure upstream and downstream // Space Sci. Rev. 1995b. V.72. P.237 – 242.

15. *Chalov S.V., Fahr H.J., Izmodenov.* Spectra of energized pick-up ions upstream of the heliospheric termination shock. I. The role of Alfvénic turbulences // *Astron. Astrophys.* 1995c. V.304. P.609 – 616.
16. *Chalov S.V.* On the Kelvin-Helmholtz instability of the nose part of the heliopause. I. Axisymmetric disturbances // *Astron. Astrophys.* 1996a. V.308. P.995 – 1000.
17. *Chalov S.V., Fahr H.J.* A three-fluid model of the solar wind termination shock including a continuous production of anomalous cosmic rays // *Astron. Astrophys.* 1996b. V.311. P.317 – 328.
18. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Reflection of pre-accelerated pick-up ions at the solar wind termination shock: the seed for anomalous cosmic rays // *Solar Phys.* 1996c. V.168. P.389 – 411.
19. *Chalov S.V., Fahr H.J.* The three-fluid structure of the particle modulated solar wind termination shock // *Astron. Astrophys.* 1997a. V.326. P.860 – 869.
20. *Chalov S.V., Fahr H.J., Izmodenov.* Spectra of energized pick-up ions upstream of the two-dimensional heliospheric termination shock. II. Acceleration by Alfvénic and by large-scale solar wind turbulences // *Astron. Astrophys.* 1997b. V.320. P.659 – 671.
21. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Phase space diffusion and anisotropic pick-up ion distributions in the solar wind: an injection study // *Astron. Astrophys.* 1998. V.335. P.746 – 756.
22. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Signatures of the interplanetary helium cone reflected by pick-up ions // *Solar Phys.* 1999a. V.187. P.123 – 144.
23. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Interplanetary pick-up ion acceleration. A study of anisotropic phase-space diffusion // *Astrophys. Space Sci.* 1999b. V.264. P.509 – 525.
24. *Chalov S.V.* Acceleration of pick-up ions at the solar wind termination shock // *Astrophys. Space Sci.* 2000a. V.274. P.25 – 33.
25. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Keplerian injection velocities reflected in helium pick-up ion spectra // *Astron. Astrophys.* 2000b. V.363. P.L21 - L24.
26. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Pick-up ion acceleration at the termination shock and the post-shock pick-up ion energy distribution // *Astron. Astrophys.* 2000c. V.360. P.381 – 390.
27. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Acceleration of pick-up ions at the termination shock in the limit of weak scattering // *Outer Heliosphere: Next Frontiers.* Eds. K. Scherer, H. Fichtner, H.J. Fahr, E. Marsch. COSPAR Col. Ser., 11. Amsterdam: Pergamon Press. 2001a. P.277 – 280.
28. *Chalov S.V.* Shock drift acceleration of pickup protons at corotating interaction regions // *J. Geophys. Res.* 2001b. V.106. P.18667 – 18675.
29. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Different solar wind types reflected in pick-up ion spectral signatures // *Astron. Astrophys.* 2002. V.384. P.299 – 302.

30. *Chalov S.V., Fahr H.J., Izmodenov V.* Evolution of pickup proton spectra in the inner heliosheath and their diagnostics by energetic neutral atom fluxes // *J. Geophys. Res.* 2003a. V.108. P.1266.
31. *Chalov S.V., Fahr H.J.* Energetic particles from the outer heliosphere appearing as a secondary pickup ion component // *Astron. Astrophys.* 2003b. V.401. P.L1 - L4.
32. *Chalov S.V., Alexashov D.B., Fahr H.J.* Reabsorption of self-generated turbulent energy by pick-up protons in the outer heliosphere // *Astron. Astrophys.* 2004a. V.416. P.L31 - L34.
33. *Chalov S.V., Izmodenov V.V., Fahr H.J.* Spatial variation of pickup proton energy spectra in the inner heliosheath and fluxes of energetic neutral atoms // *Adv. Space Res.* 2004b. V.34. P.99 – 103.
34. *Chalov S.V.* Acceleration of interplanetary pick-up ions and anomalous cosmic rays // *Adv. Space Res.* 2005. V.35. P.2106 – 2114.
35. *Chalov S.V., Alexashov D.B., Fahr H.J.* Heating of the solar wind in the outer heliosphere // *Astrophys. Space Sci. Transact.* 2006a. V.2. P.19 – 25.
36. *Chalov S.V.* Interstellar pickup ions and injection problem for anomalous cosmic rays: Theoretical aspect // *The Physics of the Heliospheric Boundaries.* Eds. V. Izmodenov and R. Kallenbach. ISSI Scientific Report No. 5. ESA-ESTEC, Paris. 2006b. P.245 – 282.
37. *Chalov S.V., Fahr H.J., Malama Y.G.* Unexpected sites of efficient stochastic acceleration in the inner heliosheath // *Annales Geophys.* 2007. V.25. P.1 – 6.
38. *Kallenbach R., Hilchenbach., Chalov S.V., Bamert K.* On the origin of energetic neutral atoms detected by the SOHO/CELLIAS/HSTOF Sensor // *AIP Conf. Proc.* 2004. V.719. P.229.
39. *Kallenbach R., Hilchenbach., Chalov S.V., Le Roux J.A., Bamert K.* On the "injection problem" at the solar wind termination shock // *Astron. Astrophys.* 2005. V.439. P.1 – 22.
40. *Gloeckler G., Möbius E., Geiss J., Bzowski M., Chalov S., et al.* Observations of the helium focusing cone with pickup ions // *Astron. Astrophys.* 2004. V.426. P.845 – 854.
41. *Malama Y.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V.* Modeling of the heliospheric interface: multi-component nature of the heliospheric plasma // *Proc. Solar Wind 11 - SOHO 16 "Connecting Sun and Heliosphere"* Whistler, Canada 12-17 June 2005.
42. *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.
43. *Möbius E., Bzowski M., Chalov S., 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.

44. *Myasnikov A.V., Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Chalov S.V.* Self-consistent model of the solar wind interaction with two-component circumsolar interstellar cloud: Mutual influence of the thermal plasma and galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.* 2000a. V.105. P.5179 – 5188.
45. *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, galactic cosmic rays, and H atoms // *J. Geophys. Res.* 2000b. V.105. P.5167 – 5177.