

На правах рукописи

КАТУШКИНА ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА

**КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНЫХ
АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ И АНАЛИЗ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ SOHO/SWAN ПО РАССЕЯННОМУ
СОЛНЕЧНОМУ ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЮ**

Специальность - 01.03.03 – Физика Солнца
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 2013

Работа выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Измоленов Владислав Валерьевич

Официальные оппоненты: Курт Владимир Гдалевич, д.ф.-м.н., заведующий
отделом «Квантовой астрофизики»
Астрокосмического центра Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН

Угольников Олег Станиславович,
к.ф.-м.н., старший научный сотрудник
ФГБУН Института космических исследований РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН

Защита состоится 20 ноября 2013 года в __ часов на заседании диссертационного совета Д 003.113.03 при ИКИ 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 проводится теоретический анализ эволюции функции распределения межзвездных атомов водорода по скоростям внутри гелиосферы - области космического пространства, занятой солнечным ветром. Разработана трехмерная нестационарная кинетическая модель распределения атомов водорода, в которой учитываются эффекты, связанные 1) с 11-летним циклом солнечной активности; 2) с зависимостью параметров солнечного ветра от гелиошироты; 3) с изменением функции распределения межзвездных атомов при их прохождении через область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. Построенная численная модель применяется для анализа экспериментальных данных по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению, полученных на космическом аппарате (КА) SOHO (прибором SWAN). Актуальность данной работы обусловлена, во-первых, интересом к исследованию границы гелиосферы, возросшим в последнее время благодаря появлению новых уникальных данных с КА Вояджер-1 и 2, а также IBEX - Interstellar Boundary Explorer, и, во-вторых, большим количеством экспериментальной информации о рассеянном солнечном Лайман-альфа излучении, накопленной за последние 25 лет.

Исторически, именно данные о рассеянном Лайман-альфа излучении привели к идее о существовании межзвездного ветра, а также к развитию теоретических моделей проникновения межзвездных нейтральных атомов внутрь гелиосферы. В самом начале космической эры (Shklovsky, 1959) при первых ракетных запусках было обнаружено излучение в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, которое невозможно было объяснить излучением от ближайших к Солнцу звезд или рассеянием солнечного излучения на нейтральных атомах в атмосфере Земли. В работах Курта & Гермогеновой (1967) и Курта & Сюняева (1967) была высказана гипотеза о галактическом происхождении измеряемого излучения. В дальнейшем более детальные измерения на аппарате OGO-5 на основании обнаруженного параллакс-эффекта показали, что единственным возможным источником

рассеянного Лайман-альфа излучения могут быть межзвездные атомы водорода, которые проникли внутрь Солнечной системы за счет относительного движения Солнца и окружающей его межзвездной среды. Такое явление получило название межзвездного ветра.

Таким образом, межзвездные атомы водорода проникают из Локальной Межзвездной Среды (ЛМС) внутрь гелиосферы, где они могут быть измерены с помощью прямых или косвенных методов. Внутри гелиосферы распределение атомов водорода является источником информации как о параметрах ЛМС, так и о свойствах переходной области между солнечным и межзвездным ветрами (в литературе эту область называют гелиосферным ударным слоем). Кроме того, солнечное Лайман-альфа излучение рассеивается на межзвездных атомах водорода. Спектральные свойства рассеянного излучения определяются функцией распределения атомов водорода по скоростям. Следовательно, измерения рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения открывают возможности для удаленной диагностики распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере.

Начиная с 1980-х годов прошлого века основной теоретической моделью распределения атомов водорода в гелиосфере являлась, так называемая, классическая горячая модель (Fahr, 1971), которая использовалась в течение многих лет для анализа и интерпретации данных по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению (Lallement et al., 1984, 1985 и др.). Тем не менее, эта модель обладает рядом недостатков. А именно, в ней не учитываются нестационарные и трехмерные эффекты, связанные с 11-летним циклом солнечной активности и с зависимостью параметров солнечного ветра от гелиошироты, а также не учитывается существование области гелиосферного ударного слоя.

В диссертационной работе разработана (глава 1) новая кинетическая модель распределения атомов водорода в гелиосфере, которая, с одной стороны, позволяет избавиться от перечисленных недостатков классической горячей модели, а с другой стороны, является достаточно простой и эффективной с вычислительной точки зрения.

Разработанная модель применяется для исследования спектральных характеристик рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в гелиосфере (глава 2), а также для анализа и интерпретации экспериментальных данных, полученных на космическом аппарате SOHO (прибором SWAN) (глава 3).

Цели и задачи диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработать трехмерную нестационарную кинетическую модель распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере, учитывающую эффекты, связанные с изменением функции распределения атомов водорода в районе границы гелиосферы.
2. Исследовать, как немаксвелловские свойства функции распределения атомов водорода во внешней гелиосфере (на 90 а.е. от Солнца) влияют на распределение (по пространству и скоростям) атомов водорода вблизи Солнца. Немаксвелловский характер функции распределения во внешней гелиосфере связан с процессом перезарядки в области гелиосферного ударного слоя.
3. Проанализировать спектральные характеристики рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в гелиосфере. Определить, как немаксвелловские свойства в распределении атомов водорода во внешней гелиосфере влияют на спектральные характеристики рассеянного Лайман-альфа излучения.
4. Провести теоретическое моделирование интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения и сравнить результаты теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными на КА SOHO (прибором SWAN).
5. Провести исследование зависимости потока массы солнечного ветра от гелиошироты на основании полных карт неба в интенсивности рассеянного излучения, полученных из данных SOHO/SWAN.

Научная новизна работы заключается в следующем. Впервые была разработана детальная кинетическая модель распределения атомов водорода в гелиосфере, которая учитывает одновременно локальные трехмерные и нестационарные

эффекты, а также кинетические эффекты, связанные с перезарядкой на границе гелиосферы. На основе этой модели были проанализированы данные SOHO/SWAN.

Автором впервые получены и выносятся на защиту следующие основные положения:

1. Впервые классифицированы немаксвелловские свойства функции распределения атомов водорода на расстоянии 90 а.е. от Солнца, возникающие за счет процесса перезарядки межзвездных атомов на протонах ЛМС и солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя.
2. Разработана трехмерная нестационарная кинетическая модель распределения межзвездных атомов водорода внутри гелиосферы с учетом эффектов, связанных с изменением функции распределения атомов в области гелиосферного ударного слоя. Данная модель является эффективным инструментом для анализа многочисленных экспериментальных данных.
3. Исследовано влияние гелиосферного ударного слоя на моменты функции распределения атомов водорода вблизи Солнца, а также на характеристики рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. Показано, что наиболее чувствительными к немаксвелловским свойствам функции распределения атомов во внешней гелиосфере являются кинетическая температура атомов и ширина линии рассеянного Лайман-альфа излучения.
4. Проведен детальный теоретический анализ зависимости ширины линии рассеянного Лайман-альфа излучения от направления луча зрения наблюдателя. Показано, что немонотонное поведение ширины линии, которое ранее было обнаружено в данных SOHO/SWAN, может быть частично объяснено в рамках текущих моделей только с учетом многокомпонентного характера плазмы межзвездной среды.
5. На основании разработанной в настоящей диссертации трехмерной и нестационарной модели распределения атомов водорода в гелиосфере был проведен анализ полных карт неба в интенсивности рассеянного Лайман-альфа

6. Установлено, что для объяснения данных SOHO/SWAN по интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения в период максимума солнечной активности (с 2001 по 2005 гг.) необходимо предположить, что график зависимости потока массы солнечного ветра от гелиошироты имеет два максимума на средних широтах ($\pm 50-60^\circ$). Информация о гелиоширотных вариациях потока массы солнечного ветра имеет принципиальное значение для глобального моделирования гелиосферного ударного слоя и исследования процессов, происходящих на границе гелиосферы.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, основана на следующем:

1. Для моделирования распределения атомов водорода использовался наиболее адекватный в данном случае, кинетический подход. Необходимость использования кинетического подхода связана с большой длиной свободного пробега атомов водорода, сравнимой с характерным размером гелиосферы. Также для задания в модели граничного условия на расстоянии 90 а.е. от Солнца использовались результаты глобальных самосогласованных кинетико-газодинамических моделей взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой (Baranov & Malama, 1993; Izmodenov et al., 2009 и др.), которые отлично зарекомендовали себя ранее тем, что с их помощью удастся объяснить множество экспериментальных фактов.
2. Разработанный численный алгоритм тестировался на классических аналитических решениях в стационарном осесимметричном случае. Также проводилось дополнительное тестирование программы в нестационарном трехмерном случае с целью выявления наиболее оптимальных параметров расчетных сеток.

3. Теоретические результаты, полученные на основании разработанной в диссертации модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными SOHO/SWAN по рассеянному Лайман-альфа излучению.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанную в диссертации модель можно эффективно применять для анализа экспериментальных данных по измерениям потоков межзвездных нейтральных атомов (водорода, гелия и др.), а также параметров рассеянного на атомах солнечного излучения с уже существующих и будущих космических аппаратов. В частности, эта модель представляет собой удобный инструмент для анализа данных по потокам межзвездных атомов водорода и гелия, измеряемых с 2009 г. на КА IBEX прибором IBEX-Lo. Кроме того, модель можно использовать для определения научных задач будущих российских и зарубежных космических миссий. В частности, в настоящее время результаты, полученные в диссертации, используются для составления научной программы прибора “Лаймус”, разрабатываемого в ИКИ РАН. Задачей прибора является измерение интенсивности и спектра рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. В случае успешного запуска прибора, разработанная в диссертации модель будет также использоваться и для анализа полученных на “Лаймусе” данных.

Апробация

Работы, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах по аэромеханике и газовой динамике механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (рук. – акад. Черный Г.Г.), семинарах Института космических исследований РАН (рук. – академик Зеленый Л.М.), семинарах лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (рук.- проф. Баранов В.Б.).

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

- на V-IX конференциях молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2009-2012 гг.);
- на Международном научном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2009-2011 гг.);
- на конференции Ломоносовские чтения (МГУ, Москва, 2010 г.);
- на конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2009-2011 гг.);
- на Всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (ИПМех РАН, Москва, 2010-2011 гг.);
- на X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Нижний Новгород, 2011 г.);
- на 18-й конференции молодых ученых по астрономии и космической физике (Национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина, 2011 г.);
- на Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика - 2008” (Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 2008 г.)
- на ежегодных конференциях Европейского геофизического общества (EGU) (г. Вена, Австрия, 2010, 2012 гг.);
- на 12-й международной конференции “Солнечный ветер” (г. Сан-Мало, Франция, 2009);
- на 11-й Научной Ассамблее Ассоциации Геомагнетизма и Аэронауки (IAGA) (г. Сопрон, Венгрия, 2009 г.);
- на 37-й, 38-й и 39-й научных ассамблеях COSPAR (г. Монреаль, Канада, 2008; г. Бремен, Германия, 2010; г. Майсор, Индия, 2012);
- на XXVIII Генеральной Ассамблее Международного астрономического общества (IAU) (г. Пекин, Китай, 2012 г.).

Публикации и личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты опубликованы в четырех статьях в рецензируемых российских и международных журналах из перечня ВАК, в главе из коллективной монографии, напечатанной в издательстве Springer, а также в трех статьях из сборников трудов конференций.

Вклад автора во все работы по теме диссертации является основным. Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации. Автором осуществлялись: разработка и тестирование всех численных программ; проведение всех расчетов; анализ полученных результатов; сравнение результатов с экспериментальными данными; подготовка и написание текстов публикаций; а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 145 страниц. В диссертации содержится 32 иллюстрации. Список используемой литературы состоит из 127 библиографических ссылок.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1 диссертации посвящена описанию кинетической модели распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. Рассматриваются как упрощенная постановка задачи – осесимметричная стационарная, так и полная – трехмерная нестационарная.

В **разделе 1.1** представлен исторический обзор работ, связанных с моделированием распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. Впервые задача о движении облака частиц в гравитационном поле звезды с учетом конечной температуры была решена аналитически в работе Danby & Camm (1957). В

дальнейшем (в работах Meier, 1977 и Wu & Judge, 1979) это решение было обобщено и адаптировано для описания распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. Такая модель стала называться классической горячей моделью. В **подразделе 1.1.2** представлено аналитическое решение для функции распределения атомов водорода по скоростям в случае классической горячей модели.

В **подразделе 1.1.3** описываются современные представления о структуре области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой. В **подразделе 1.1.4** приводится обзор работ, посвященных современному развитию классической горячей модели.

В **разделе 1.2** представлена разработанная автором диссертации кинетическая модель распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере в осесимметричном стационарном случае. Эта модель совмещает в себе сравнительную простоту классической горячей модели с возможностью учитывать немаксвелловские свойства в функции распределения атомов водорода на границе гелиосферы, связанные с существованием области гелиосферного ударного слоя. В **подразделе 1.2.1** приводятся основные уравнения для описания распределения атомов водорода. Кинетическое уравнение для функции распределения атомов по скоростям выглядит следующим образом:

$$\mathbf{w} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w})}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w})}{\partial \mathbf{w}} = -\beta(\mathbf{r}) \cdot f(\mathbf{r}, \mathbf{w}).$$

Здесь $f(\mathbf{r}, \mathbf{w})$ - функция распределения атомов водорода по скоростям $\mathbf{w}$ в зависимости от пространственной координаты $\mathbf{r}$. Результирующая сила $\mathbf{F}(\mathbf{r})$, действующая на атом вблизи Солнца, является суммой силы гравитационного притяжения к Солнцу ($\mathbf{F}_g$) и силы радиационного отталкивания ($\mathbf{F}_{rad}$). Результирующая сила определяется безразмерным параметром $\mu = |\mathbf{F}_{rad}| / |\mathbf{F}_g|$, который в общем случае зависит от радиальной компоненты скорости атома, времени и гелиошироты, но в рассматриваемом в разделе 1.2 стационарном осесимметричном случае полагалось, что $\mu = const$. Параметр $\beta(\mathbf{r})$ представляет собой

суммарную частоту ионизации, складывающуюся из частоты фотоионизации и частоты перезарядки. Общие выражения для вычисления частоты перезарядки и фотоионизации приведены в **подразделе 1.2.2** диссертации.

В **подразделе 1.2.3** обсуждаются немаксвелловские эффекты в функции распределения межзвездных атомов водорода на расстоянии 90 а.е. от Солнца, вызванные процессом перезарядки первичных межзвездных атомов водорода на протонах ЛМС и солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя. В результате перезарядки в этой области образуются, так называемые, вторичные межзвездные атомы, функция распределения которых зависит от локальных свойств плазмы в области их рождения.

В **подразделе 1.2.4** рассматриваются четыре различных способа задания граничного условия для функции распределения атомов водорода по скоростям, которые в той или иной степени учитывают влияние гелиосферного ударного слоя. Сравнение результатов моделей с различными граничными условиями позволяет выявить роль каждого эффекта в отдельности.

В **подразделе 1.2.5** описан метод характеристик для решения шестимерного кинетического уравнения.

В **подразделе 1.2.6** представлены результаты, полученные в рамках разработанной модели для различных способов задания граничного условия. Также проводится сравнение полученных результатов с результатами самосогласованной кинетико-газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой (Baranov & Malama, 1993). В целом результаты проведенного сравнения свидетельствуют о том, что изменения функции распределения атомов водорода в гелиосферном ударном слое (которые вообще не учитываются в классической горячей модели) приводят к значительным изменениям в распределении (как в пространстве, так и по скоростям) атомов водорода внутри гелиосферы. Показано, что наиболее чувствительной характеристикой к эффектам границы гелиосферы является кинетическая температура атомов

$$T_z(\mathbf{r}) \sim \int f(\mathbf{r}, \mathbf{w}) \cdot (V_z(\mathbf{r}) - w_z)^2 d\mathbf{w}.$$

В разделе 1.3 диссертации описана трехмерная нестационарная кинетическая модель. В рамках этой модели решается нестационарное кинетическое уравнение, в котором учитывается зависимость частоты ионизации атомов β_E и параметра μ от времени t и гелиошироты λ . Кроме того, в модели учитывается зависимость параметра μ от радиальной компоненты скорости атома w_r . В подразделе 1.3.1 представлена математическая постановка задачи (уравнения и граничные условия) в трехмерном нестационарном случае. В подразделе 1.3.2 описаны способы задания входных параметров задачи: балансового параметра $\mu(t, \lambda, w_r)$, частот фотоионизации $\beta_{ph,E}(t, \lambda)$ и перезарядки $\beta_{ex,E}(t, \lambda)$ на 1 а.е. Для задания этих зависимостей используются различные экспериментальные данные о параметрах солнечного ветра и излучения. В частности, используются базы данных OMNI-2, SOLAR2000, LASP. Гелиоширотная зависимость частоты ионизации атомов задается на основании результатов анализа данных SOHO/SWAN по рассеянному Лайман-альфа излучению (Quemerais et al. 2006a).

В подразделе 1.3.3 приводятся результаты численного моделирования распределения атомов водорода в гелиосфере в трехмерном нестационарном случае. Показано, что на расстоянии 1 а.е. от Солнца нестационарные эффекты приводят к значительным (до 30%) колебаниям концентрации, средней скорости и средней температуры атомов в течение 11-летнего цикла солнечной активности, а на расстоянии 10 а.е. от Солнца параметры атомов остаются практически постоянными в течение цикла. На рис. 1 показаны концентрация, средняя скорость V_r и кинетическая температура $T_r(\mathbf{r}) \sim \int f(\mathbf{r}, \mathbf{w}) \cdot (V_r(\mathbf{r}) - w_r)^2 d\mathbf{w}$ первичных и вторичных межзвездных атомов водорода на расстоянии 1 а.е. от Солнца в зависимости от гелиошироты и гелиодолготы. Видно, что зависимость частоты перезарядки от гелиошироты приводит к раздвоению максимумов и минимумов в распределении концентрации и температуры атомов водорода.

В разделе 1.4 диссертации приводится заключение к первой главе.

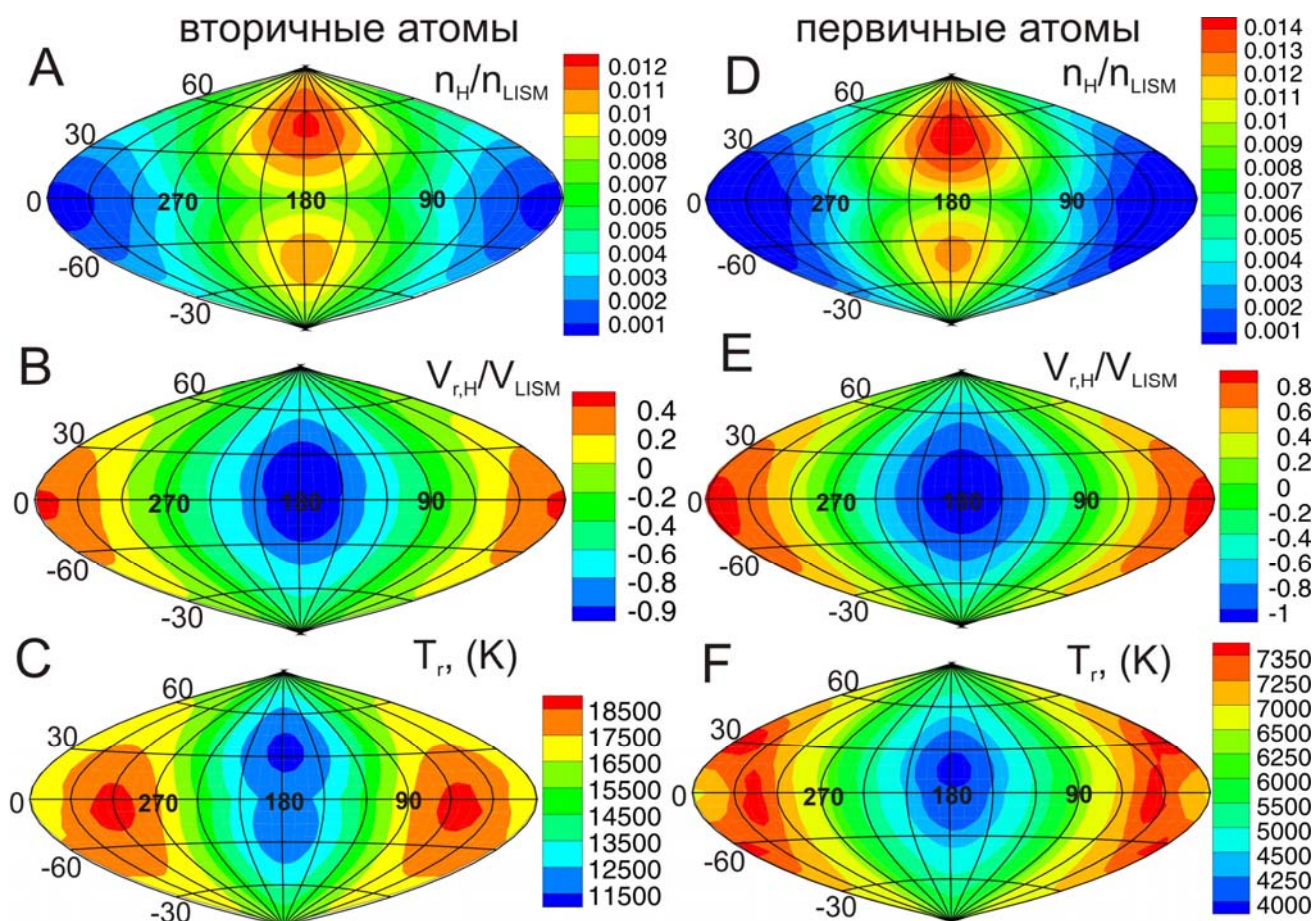


Рис.1. Концентрация (A, D), радиальная скорость (B, E) и радиальная кинетическая температура T_r (C, F) вторичных (графики слева) и первичных (графики справа) межзвездных атомов на расстоянии 1 а.е. от Солнца в зависимости от направления луча зрения наблюдателя. По осям отложены гелиоширота и гелиодолгота в гелиографических координатах. Эти результаты получены в условиях солнечного минимума (1996-го года), когда гелиоширотная зависимость частоты перезарядки проявляется особенно сильно.

Глава 2 диссертации посвящена теоретическому исследованию спектральных характеристик рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. Описана математическая модель переноса излучения, которая позволяет вычислять спектры рассеянного Лайман-альфа излучения в произвольном направлении луча зрения, если известно распределение атомов водорода вдоль луча зрения. Исследуется вопрос о том, как немаксвелловские эффекты (связанные с процессом перезарядки в гелиосферном ударном слое) в функции распределения атомов водорода проявляются в спектрах рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на 1 а.е.

В разделе 2.1 приводится исторический обзор работ, связанных с измерением и исследованием рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения.

В разделе 2.2 описана модель переноса излучения. В подразделе 2.2.1 приводится способ получения формального аналитического решения уравнения переноса излучения. В данной работе рассматривается только излучение за счет однократно рассеянных фотонов, при этом учитывается поглощение рассеянного излучения между точкой рассеяния и наблюдателем. В этом случае решение уравнения переноса записывается аналитически в виде интеграла вдоль луча зрения.

В разделе 2.3 представлены результаты расчетов спектральных характеристик рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на основании распределений межзвездных атомов водорода. Указанные распределения были получены в рамках различных кинетических моделей из первой главы диссертации.

В подразделе 2.3.1 исследуется влияние кинетических эффектов в распределении межзвездных атомов водорода на спектральные характеристики рассеянного на атомах солнечного Лайман-альфа излучения. Показано, что классические модели, которые не учитывают эффекты гелиосферного ударного слоя, приводят к значительным отличиям в параметрах рассеянного Лайман-альфа излучения по сравнению с моделями, которые включают в себя немаксвелловский характер функции распределения атомов водорода после их прохождения через область гелиосферного ударного слоя. Показано, что ширина линии рассеянного Лайман-альфа излучения является наиболее чувствительной характеристикой к немаксвелловским свойствам в распределении атомов водорода во внешней гелиосфере.

В подразделе 2.3.2 проводится детальное теоретическое исследование зависимости ширины линии (T_{los}) рассеянного Лайман-альфа излучения от направления луча зрения наблюдателя. Изучается влияние на эту зависимость многокомпонентного характера плазмы ЛМС, а также трехмерных и нестационарных эффектов. В работах Costa et al. (1999) и Quemerais et al. (2006b) на основании анализа экспериментальных данных SOHO/SWAN было показано, что в

период 1996-1997 гг. наблюдался минимум ширины линии рассеянного излучения при $\theta = 50^\circ - 60^\circ$, тогда как классическая однокомпонентная горячая модель предсказывает монотонный рост ширины линии при увеличении угла θ . Результаты исследования, проведенного в диссертации, показывают, что ни одна из имеющихся на данный момент моделей распределения атомов водорода в гелиосфере не приводит к образованию минимума в T_{los} , сравнимого по размеру с наблюдаемым в данных SOHO/SWAN. Тем не менее, учет многокомпонентного характера плазмы ЛМС в модели позволяет добиться качественного согласия с экспериментальными данными (см. рис. 2). Многокомпонентный характер плазмы учитывается в модели с помощью задания граничного условия, основанного на результатах многокомпонентной модели гелиосферного ударного слоя (Malama et al., 2006).

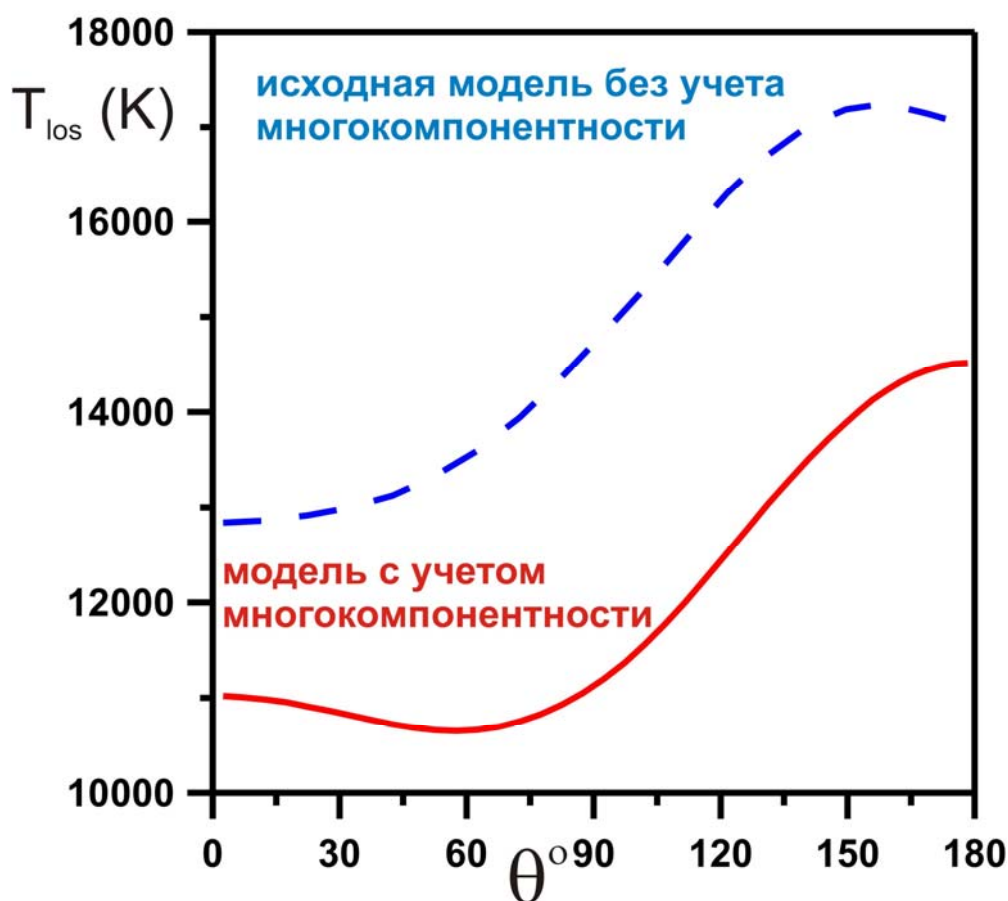


Рис.2. Графики зависимости ширины линии T_{los} рассеянного Лайман-альфа излучения от угла θ . Угол θ отсчитывается от направления навстречу вектору скорости ЛМС. Данные результаты получены в рамках осесимметричных стационарных моделей распределения атомов водорода в гелиосфере с граничными условиями в виде трехмерного нормального распределения. Пунктирная

кривая соответствует модели без учета многокомпонентного характера плазмы ЛМС; сплошная кривая – модели с учетом многокомпонентного характера плазмы.

В подразделе 2.3.3 проводится исследование зависимости моментов спектра рассеянного излучения от значений определяющих параметров задачи μ и β_E в осесимметричном стационарном случае. В разделе 2.4 приводится заключение к главе 2.

Глава 3 посвящена исследованию зависимости потока массы солнечного ветра от гелиошироты на основании анализа карт неба в интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения.

В разделе 3.1 приведено введение к данной проблеме.

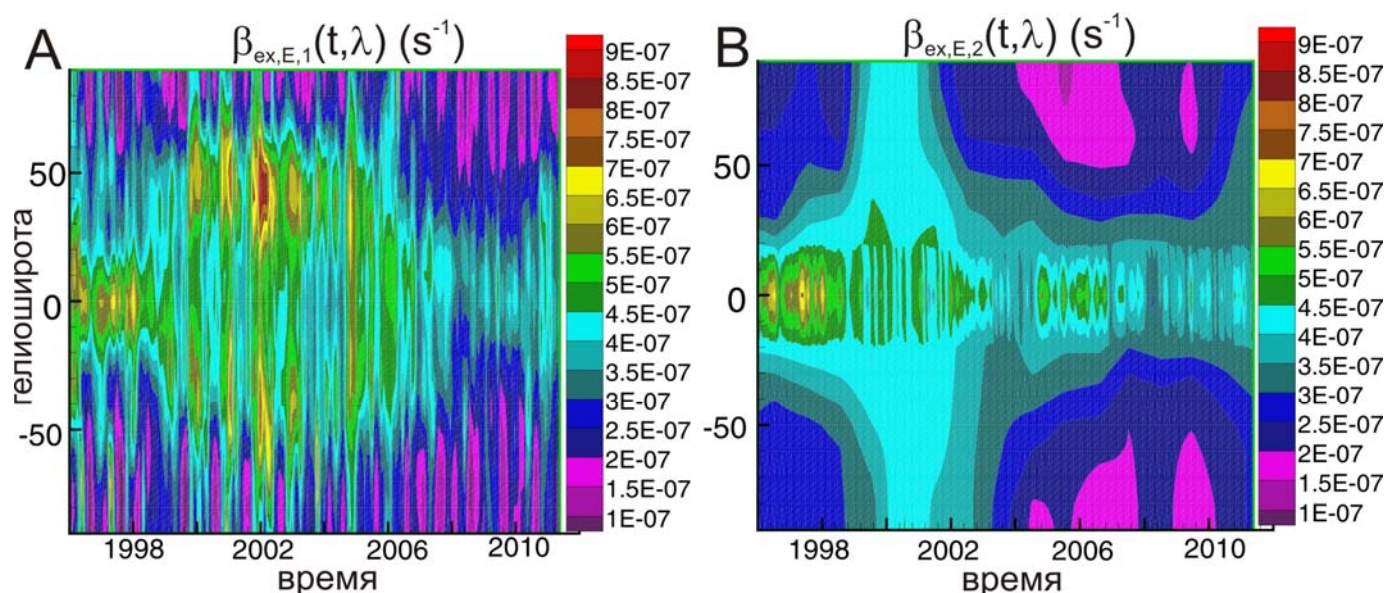


Рис.3. Частота перезарядки на 1 а.е. в зависимости от времени и гелиошироты. График А соответствует результатам первого способа, основанного на анализе данных по рассеянному Лайман-альфа излучению ($\beta_{ex,E,1}(t, \lambda)$). График В соответствует результатам второго способа, основанного на данных по межпланетным мерцаниям, а также измерениях Ulysses ($\beta_{ex,E,2}(t, \lambda)$).

В разделе 3.2 описаны два имеющихся на сегодняшний день способа задания зависимости частоты перезарядки (или потока массы) солнечного ветра от времени и гелиошироты. Первый способ основан на методе, изложенном в Quemerais et al. (2006a), и связан с анализом данных SOHO/SWAN. Частоту перезарядки,

полученную данным способом, мы будем обозначать $\beta_{ex,E,1}(t, \lambda)$. Второй способ основан на результатах работы Sokol et al. (2012). В этой работе были найдены гелиоширотные и временные вариации скорости солнечного ветра (исходя из измерений межпланетных мерцаний), а также плотности солнечного ветра (исходя из измерений на КА Ulysses и некоторых предположений). Частоту перезарядки, полученную этим способом, мы будем обозначать $\beta_{ex,E,2}(t, \lambda)$. Отметим, что частота перезарядки напрямую определяется потоком массы солнечного ветра. На рис. 3 показаны графики зависимости полученных частот перезарядки от времени и гелиошироты. Видно, что эти функции качественно различны. В частности, функция $\beta_{ex,E,1}(t, \lambda)$, имеет характерные максимумы на средних широтах в 2000-2005 гг. Эта особенность отсутствует во второй функции $\beta_{ex,E,2}(t, \lambda)$. Как будет видно в дальнейшем, это различие в частотах перезарядки приводит к качественным различиям в картах интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения.

В разделе 3.3 приводятся результаты расчетов карт неба в интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. Чтобы выяснить, насколько различия в частоте перезарядки (т.е. между функциями $\beta_{ex,E,1}$ и $\beta_{ex,E,2}$) сказываются на распределении рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения, в диссертации были проведены расчеты распределения атомов водорода в гелиосфере в рамках разработанной трехмерной нестационарной кинетической модели, описанной в главе 1. При этом зависимость частоты перезарядки от времени и гелиошироты задавалась либо в виде $\beta_{ex,E,1}$, либо в виде $\beta_{ex,E,2}$. После этого были вычислены карты интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в рамках описанной в главе 2 модели переноса излучения. Расчеты были проведены отдельно для периодов минимума (1997 и 2009 гг.) и максимума (2002-2005 гг.) солнечной активности. Показано, что в период минимума солнечной активности обе модели с различными способами задания частоты перезарядки приводят к качественно похожим результатам и к хорошему согласию с данными SWAN. Однако, в период максимума солнечной активности результаты качественно различаются.

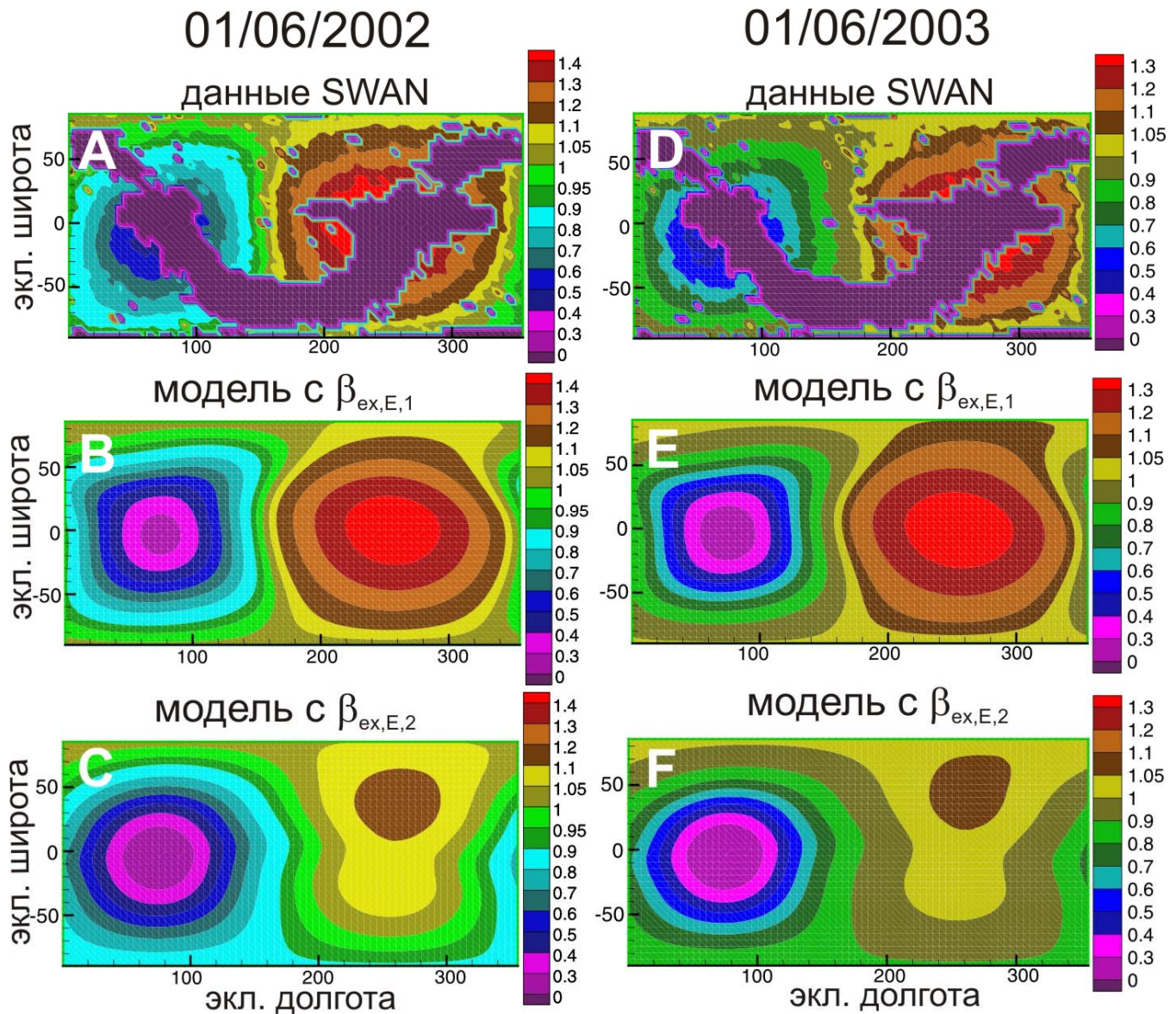


Рис.4. Результаты расчетов в период максимума солнечной активности (2002-2003 гг.). Графики А-F представляют полные карты неба в интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения (по осям отложены эклиптическая широта и долгота). Все интенсивности нормированы таким образом, что для каждой карты нормированная интенсивность в одном выбранном направлении (характеризуемым 80.5° по широте и 120.5° по долготе) равна 1. Графики А и D показывают экспериментальные данные SOHO/SWAN. Отметим, что полоса с нулевой интенсивностью, проходящая через всю карту в данных SWAN, не имеет физического смысла и связана с тенью аппарата. Графики В и Е представляют теоретические результаты, полученные в рамках нашей модели с частотой перезарядки $\beta_{ex,E,1}$. Графики С и F представляют теоретические результаты, полученные в рамках той же модели, но с частотой перезарядки $\beta_{ex,E,2}$.

На рис. 4 показаны карты неба в интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения, полученные для 2002-2003 гг. Верхняя строка соответствует данным SWAN, средняя строка – результатам модели с частотой перезарядки $\beta_{ex,E,1}$, а нижняя строка – результатам модели с частотой перезарядки $\beta_{ex,E,2}$. Видно, что в данных SWAN, как и в результатах модели с $\beta_{ex,E,1}$, максимум интенсивности располагается в носовой части гелиосферы при небольших гелиоширотах. В то же время, в результатах модели с $\beta_{ex,E,2}$ максимум интенсивности располагается ближе к северному эклиптическому полюсу. Такие различия связаны с зависимостью частоты ионизации атомов от гелиошироты в период максимума солнечной активности. А именно, в данных $\beta_{ex,E,1}$ в это время присутствует два максимума на средних широтах, а в данных $\beta_{ex,E,2}$ – один максимум в районе солнечного экватора (т.е. при нулевой гелиошироте). Были проведены специальные тестовые расчеты, которые подтвердили, что изменение других параметров модели (граничных условий и параметра μ) не позволяет добиться качественного совпадения в картах интенсивности между результатами модели с $\beta_{ex,E,2}$ и данными SWAN. При этом результаты модели с $\beta_{ex,E,1}$ приводят к отличному совпадению с экспериментальными данными. Это говорит о том, что характерные максимумы частоты перезарядки $\beta_{ex,E,1}$ на средних широтах в период максимума солнечной активности действительно должны присутствовать, чтобы было возможно объяснить данные SOHO/SWAN по интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения в рамках существующих моделей.

В разделе 3.4 приводится заключение к главе 3.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана новая трехмерная нестационарная кинетическая модель распределения межзвездных атомов водорода по пространству и скоростям в

гелиосфере. В рамках такой модели были впервые учтены немаксвелловские эффекты в распределении атомов водорода, связанные с перезарядкой атомов на протонах в области гелиосферного ударного слоя. Разработанная модель представляет собой эффективный инструмент, который позволяет вычислять функцию распределения атомов водорода по скоростям с любой требуемой точностью.

2. Проведено исследование влияния эффектов, связанных с перезарядкой в гелиосферном ударном слое, на распределение атомов водорода внутри гелиосферы. Показано, что неоднородность потока атомов во внешней гелиосфере, связанная с возмущением потока в гелиосферном ударном слое, приводит к уменьшению концентрации атомов водорода в окрестности Солнца. Также установлено, что зависимость кинетической температуры T_z от гелиоцентрического расстояния является качественно различной для моделей с учетом и без учета третьих моментов в функции распределения атомов водорода на границе расчетной области.
3. Проанализировано влияние нестационарных и трехмерных эффектов на распределение атомов водорода в гелиосфере. Впервые в модели были учтены реальные данные о гелиоширотной зависимости параметров солнечного ветра, полученные на основании экспериментальных данных. Показано, что зависимость частоты ионизации атомов от гелиошироты приводит к качественным изменениям в концентрации и температуре атомов на 1 а.е.
4. Проведено исследование влияния кинетических эффектов гелиосферного ударного слоя на измеряемые с орбиты Земли характеристики рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения. Показано, что использование ранее общепринятой “классической горячей модели” приводит к ошибкам в интенсивности Лайман-альфа излучения (от 2% в носовой части гелиосферы до 25% в хвостовой части), а также к ошибкам в ширине линии рассеянного излучения (до 18%).

5. Проведено детальное исследование зависимости ширины линии рассеянного Лайман-альфа излучения от направления луча зрения наблюдателя. Показано, что в рамках имеющихся на сегодняшний день моделей образование минимума, обнаруженного в данных SOHO/SWAN, возможно только при учете многокомпонентного характера плазмы межзвездной среды.
6. Проведено моделирование полных карт неба в интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения и сравнение с данными SOHO/SWAN. Моделирование проводилось для двух имеющихся на сегодняшний день способов задания временных и гелиоширотных вариаций потока массы солнечного ветра. Показано, что пространственное распределение интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на 1 а.е. определяется зависимостью частоты ионизации атомов водорода от гелиошироты. Это означает, что экспериментальные данные по Лайман-альфа излучению можно использовать для диагностики зависимости параметров солнечного ветра от широты.
7. Показано, что разработанная трехмерная нестационарная модель с учетом гелиоширотной зависимости параметров солнечного ветра, основанной на результатах Quemerais et al. (2006a), приводит к хорошему совпадению с данными SOHO/SWAN по пространственному распределению интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения. В то же время, результаты аналогичной модели с учетом гелиоширотной зависимости параметров солнечного ветра, основанной на результатах Sokol et al. (2012), противоречат данным SOHO/SWAN в период максимума солнечной активности (2002-2005 гг.).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Katushkina O.A., Izmodenov V.V., Quemerais E., Sokol J.M., Heliolatitudinal and time variations of the solar wind mass flux: inferences from the solar Lyman-alpha intensity maps // Journal of Geophysical Research. –2013. –V. 118. –P. 2800-2808.
2. Катушкина О.А., Измоленов В.В., Влияние эффектов гелиосферного ударного слоя на параметры рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения,

- измеряемого на орбите Земли // Космические исследования. –2012. –Т.50. –№ 2. – С.147-157.
3. Katushkina O.A., Izmodenov V.V., Spectral properties of backscattered solar Ly-alpha radiation in the heliosphere: a theoretical search of the heliospheric boundaries effects // Advances in Space Research. –2011. –V. 48. –Is. 12. –С. 1967-1979.
 4. Катушкина О.А., Измоденов В.В., Влияние эффектов гелиосферного интерфейса на распределение параметров атомов межзвездного водорода внутри гелиосферы // Письма в Астрон. Ж. –2010. –Т. 36. –№ 4. –С.310-319.
 5. Izmodenov V.V., Katushkina O.A., Quemerais E., Bzowski M., Distribution of Interstellar Hydrogen Atoms in the Heliosphere and Backscattered Solar Lyman-alpha // chapter 2 in “Cross-Calibration of Past and Present Far UV Spectra of Solar System Objects and the Heliosphere”, ISSI Scientific Report Series. ed. R.M. Bonnet, E. Quemerais, M. Snow. –2013. –V.13. –P.7-65. Springer.
 6. Катушкина О.А., Кинетические эффекты в распределении межзвездных атомов водорода в межпланетном пространстве: анализ данных по рассеянному лайман-альфа излучению // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. №4. -часть 5 (сборник трудов X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики). –2011. – С.313-315.
 7. Катушкина О.А., О спектральных свойствах рассеянного солнечного лайман-альфа излучения: теоретическое исследование эффектов, связанных с границей гелиосферы // Сборник трудов 4-ой Всероссийской школы-семинара "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем", ИПМех РАН. –2011. –С.71-77.
 8. Катушкина О.А., Измоденов В.В., Теоретическое моделирование движения атомов водорода из межзвездной среды внутрь гелиосферы // Сборник трудов XIII Школы молодых ученых “Актуальные проблемы физики”, ФИАН. –2010. – С.128-129.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Shklovsky I.S., On hydrogen emission in the night glow // Planet. Space Sci. –1959. – V.1. –P.63-65.
2. Курт В.Г., Гермагенова Т.А., Рассеяние солнечного Ly-а излучения на галактическом водороде // Астрон. Ж. –1967. –Т.44. -№2. –С. 352-357.
3. Курт В.Г., Сюняев Р.А., Наблюдения и интерпретация ультрафиолетового излучения галактики // Астрон. Ж. –1967. –Т.44. –№6. –С. 1157-1161.
4. Fahr H.J., The Interplanetary Hydrogen Cone and its Solar Cycle Variations // Astronomy and Astrophysics. –1971. –V.14. –P.263.
5. Lallement, R., Bertaux, J.L., Kurt, V.G., and Mironova, E.N. Observed perturbations of the velocity distribution of interstellar H atoms in the solar system with Prognoz Lyman a measurements // Astron. Astrophys. –1984. –V.140. –P.243-250.
6. Lallement, R., Bertaux, J.L., and Kurt, V.G. Solar wind decrease at high heliographic latitudes detected from Prognoz interplanetary Lyman-alpha mapping // J. Geophys. Res. –1985. –V.90. –P.1413-1423.
7. 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. –No. A9. –P.15,157-15,163.
8. Izmodenov V.V., Malama Yu.G., Ruderman M.S., Chalov S.V., Alexashov D.B., Katushkina O.A., Provornikova E.A., Kinetic-gasdynamics modeling of the heliospheric interface // Space Science Reviews. –2009. –V. 146. –Is. 1-4. –P. 329-351.
9. Danby J.M.A., and Camm G.L., Statistical dynamics and accretion // Monthly Notices of the Royal Astron. Soc. –1957. –V.117. –P.50-71.
10. Meier R.R., Some optical and kinetic properties of the nearby interstellar gas // Astronomy and Astrophysics. –1977. –V. 55. –No. 2. –P. 211-219.
11. Wu F.M., and Judge D.L., Temperature and flow velocity of the interplanetary gases along solar radii // Astrophys. J. –1979. –V.231. –P. 594-605.

- 12.Quemerais, E., et al., Interplanetary hydrogen absolute ionization rates: Retrieving the solar wind mass flux latitude and cycle dependence with SWAN/SOHO maps // J. Geophys. Res. –2006a. –V.111. –P.A09114.
- 13.Costa J., Lallement R., Quemerais E. Heliospheric interstellar H temperature from SOHO/SWAN H cell data // Astron. Astrophys. –1999. –V. 349. –P. 660-672.
- 14.Quemerais E., Lallement R., Bertaux J.-L., et al. Interplanetary Lyman-alpha line profiles: variations with solar activity cycle // Astronomy and Astrophysics. –2006b. – V.455. –Is.3. –P.1135-1142.
- 15.Malama Y.G., Izmodenov V.V., Chalov S.V., New model of the heliospheric interface: three-fluid plasma approximation // Astron. Astrophys. –2006. –V.445. –P.693-701.
- 16.Sokol J. M., et al., Heliolatitude and Time Variations of Solar Wind Structure from in situ Measurements and Interplanetary Scintillation Observations // Solar Physics. – 2012. –doi:10.1007/s11207-012-9993-9.