

На правах рукописи

Балюкин Игорь Игоревич

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ
КОМПОНЕНТ В ГЕЛИОСФЕРЕ И ЭКЗОСФЕРЕ ЗЕМЛИ**

01.03.03 — Физика Солнца

01.02.05 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Москва – 2022

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

Научный руководитель: **Измоденов Владислав Валерьевич**
доктор физико-математических наук,
профессор механико-математического
факультета МГУ имени М. В. Ломоносова,
заведующий лабораторией Института
космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты: **Шематович Валерий Иванович**
доктор физико-математических наук,
заведующий отделом исследования
Солнечной системы Института астрономии
РАН (ИНАСАН)

Чашей Игорь Владимирович
доктор физико-математических наук,
заместитель директора по научным
вопросам Пушчинской Радиоастрономической
обсерватории Физического института
им. П. Н. Лебедева РАН (ПРАО ФИАН РАН)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт земного
магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн имени Н. В. Пушкина РАН
(ИЗМИРАН)

Защита состоится «___»_____ 2022 г. в __ 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 РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических исследований РАН.

Автореферат разослан «___»_____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Цупко О. Ю.

Общая характеристика работы

Солнечная система движется в космическом пространстве относительно локальной межзвездной среды (ЛМС), которая ее окружает, со скоростью порядка 26 км/с [Witte, 2004]. Солнечный ветер (СВ) – это сверхзвуковой поток полностью ионизованной плазмы, который возникает вследствие непрерывного расширения верхней атмосферы Солнца (солнечной короны). При взаимодействии СВ с плазменной компонентой ЛМС образуется структура, которая носит название гелиосферного ударного слоя, и состоит из тангенциального разрыва (гелиопаузы), который отделяет плазму СВ от плазменной составляющей межзвездной среды, и двух ударных волн (гелиосферной и внешней), что схематично изображено на Рисунке 1. На гелиосферной ударной волне происходит торможение солнечного ветра, а на внешней – потока межзвездной среды.

Локальная межзвездная среда является частично-ионизованной и содержит, помимо плазменной компоненты, также и атомы различных элементов (H, He, O, Ne и др.), которые могут проникать в гелиосферу из-за относительного движения Солнца и ЛМС. Заряженная и нейтральная компоненты влияют друг на друга как в области ударного слоя, так и внутри гелиосферы. Главным образом из-за процесса перезарядки ($H^+ + H \rightleftharpoons H + H^+$) область между гелиосферной и внешней ударными волнами является своеобразным фильтром для межзвездных атомов водорода, проникающих в Солнечную систему из межзвездной среды, при этом длина свободного пробега по процессу перезарядки сравнима с характерным размером гелиосферы. Процесс резонансной перезарядки влияет на течение заряженной компоненты, структуру области взаимодействия, и, в частности, на расстояния от Солнца до этой области [см., например, Izmodenov, 2000].

Кислород является третьим элементом (после водорода и гелия) по космическому содержанию в ЛМС. Межзвездные атомы кислорода особенно интересны потому, что кислород обладает достаточно большим сечением перезарядки на протонах, сравнимым с сечением резонансной перезарядки $H - H^+$ для водорода, из-за чего распределение кислорода внутри гелиосферы существенно зависит от распределения протонов в гелиосферном удар-

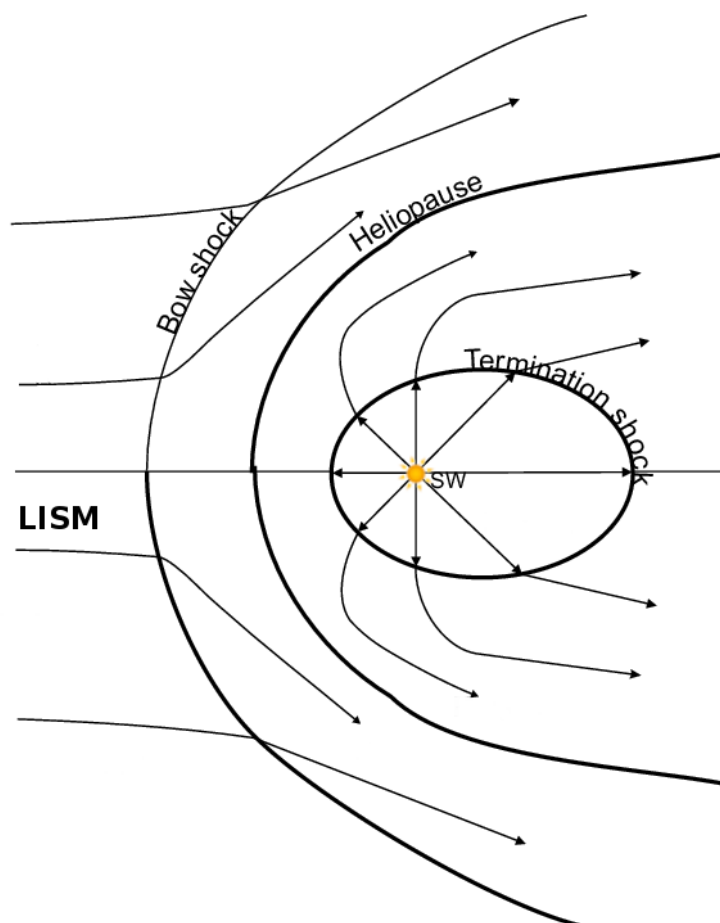


Рисунок 1. Схематическая картина гелиосферного ударного слоя взаимодействия солнечного ветра (SW) с локальной межзвездной средой (LISM): внутренняя ударная волна (Termination Shock), внешняя ударная волна (Bow Shock) и тангенциальный разрыв (Heliopause).

ном слое. Наряду с первичными межзвездными атомами кислорода, которые напрямую проникают в гелиосферу из межзвездной среды, присутствует также вторичная компонента, которая образуется в окрестности гелиопаузы из-за перезарядки межзвездных ионов кислорода с атомами водорода ($O^+ + H \rightarrow O_{\text{sec}} + H^+$), и ее существование в гелиосфере было ранее предсказано теоретически [Izmodenov et al., 1997, 1999, 2004]. Потоки межзвездного нейтрального кислорода с 2009 года измеряются на космическом аппарате (КА) Interstellar Boundary Explorer (IBEX), который находится на орбите вокруг Земли [McComas et al., 2009]. Первые прямые измерения межзвездных атомов кислорода на КА IBEX показали, что в картах потоков существует некоторая особенность в виде «удлиненного хвоста» (см. Рисунок 2А). В работе Park et al. [2015] сделана гипотеза, что «удлиненный хвост» соответствует вторичной компоненте межзвездного кислорода. Однако, эта гипотеза

требует теоретической проверки. В **первой главе** диссертационной работы исследуется распределение межзвездных атомов кислорода в гелиосфере на основе кинетической модели распределения атомов и трехмерной модели взаимодействия солнечного ветра с ЛМС, а также проводится сравнение результатов численных расчетов с данными, полученными прибором IBEX-Lo (0.01 – 2 кэВ) на КА IBEX.

Наибольшее космическое содержание в ЛМС имеют атомы водорода. В результате ионизации межзвездных атомов водорода в области сверхзвукового солнечного ветра образуются захваченные протоны, которые захватываются гелиосферным магнитным полем и переносятся во внутренний ударный слой (в область между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой). На своем пути захваченные протоны могут испытывать стохастическое ускорение, вызванное турбулентностью солнечного ветра, ускорение при взаимодействии с распространяющимися межпланетными ударными волнами, и ускорение на гелиосферной ударной волне, вследствие чего в распределении захваченных протонов по скоростям формируется высокоэнергетический «хвост».

Во внутреннем ударном слое, где плазма солнечного ветра замедлена и сильно нагрета ($T \sim 10^6$ К), атомы водорода перезаряжаются на горячих протонах, что приводит к образованию энергичных нейтральных атомов (ЭНА) с энергиями порядка нескольких кэВ. Энергичные нейтральные атомы имеют большие длины свободного пробега, и измеряя потоки ЭНА можно получать информацию о распределении протонов в области гелиосферного ударного слоя. Некоторые ЭНА двигаются в направлении Солнца, и часть из них попадает в окрестность орбиты Земли, где они регистрируются прибором IBEX-Hi (0.3 – 6 кэВ) на КА IBEX. Во **второй главе** диссертационной работы проводится исследование распределения захваченных протонов по скоростям. С использованием численной модели для потоков ЭНА из области внутреннего ударного слоя и данных, полученных прибором IBEX-Hi, определяются параметры энергичной популяции захваченных протонов, отвечающей за высокоскоростные «хвосты», за гелиосферной ударной волной для различных направлений. Отличительной чертой разработанной модели является детальный кинетический подход при рассмотрении надтепловой составляющей протонов в гелиосфере (захваченных протонов) в трехмерной нестационарной постановке.

Помимо прямых измерений, распределение нейтральной компоненты может быть исследовано и косвенным способом. Солнце является мощным

источником Лайман- α фотонов с длиной волны 121.567 нм ультрафиолетовой части спектра. При взаимодействии Лайман- α фотона с атомом водорода сначала происходит поглощение фотона, при котором атом переходит в возбужденное состояние, а затем испускается новый Лайман- α фотон (резонансное рассеяние). Характеристики рассеянного Лайман- α излучения зависят от распределения атомов водорода, и измеряя излучение можно исследовать распределение атомов, в частности, в геокороне – водородной компоненте экзосферы (внешней части атмосферы) Земли. Лайман- α фотоны поглощаются нижними слоями атмосферы, и, следовательно, знания о геокороне могут быть получены только благодаря космическим экспериментам. Существует ограниченное количество наблюдений рассеянного солнечного Лайман- α излучения от геокороны, выполненных космическими аппаратами, которые находились вне самой экзосферы. В **третьей главе** проводится детальный анализ таких данных, полученных прибором Solar Wind Anisotropies (SWAN) на КА Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) с орбиты вокруг точки Лагранжа L_1 , на основе кинетической модели распределения водорода в экзосфере. В работе исследуется распределение атомов водорода в геокороне и дается оценка ее протяженности.

Актуальность темы исследования

Актуальность работы обусловлена, во-первых, необходимостью анализа и объяснения большого количества экспериментальных данных, накопленных КА IBEX, SOHO, Voyager 1/2 и др., и, во-вторых, растущим в научном сообществе интересом к данной области исследования, что вызвано ожидаемым в 2025 г. запуском нового КА IMAP – Interstellar Mapping and Acceleration Probe (NASA, США), а также планированием космических миссий Interstellar Probe (NASA, США), Interstellar Express (CNSA, Китай) и Нуклон (Роскосмос, Россия). Космические миссии IMAP, Interstellar Probe, Interstellar Express и Нуклон будут исследовать свойства гелиосферного ударного слоя и локальной межзвёздной среды. Для постановки корректных научных задач миссий и анализа данных наблюдений необходимо знать распределения атомов и захваченных протонов в гелиосфере, моделирование которых может быть проведено с использованием разработанных автором моделей.

Популяция захваченных протонов оказывает динамическое влияние на глобальную структуру взаимодействия солнечного ветра с локальной меж-

звездной средой, поскольку эта компонента является доминирующей по давлению в гелиосфере. Тем не менее, на данный момент ни одна из существующих глобальных моделей гелиосферы не учитывает захваченные протоны самосогласованно и в рамках необходимого для их рассмотрения кинетического подхода. Таким образом, построение корректной кинетической модели распределения захваченных протонов в гелиосфере, которое проводится во второй главе диссертационной работы, является следующим шагом в развитии модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой.

Поскольку водородная экзосфера планеты отражает присутствие воды и/или метана в нижних слоях атмосферы (для Марса, Венеры и Земли), то исследование экзосферы становится предметом более общего интереса в рамках будущих экзопланетных исследований.

Цели и задачи работы

1. Анализ данных, полученных на КА IBEX (прибор IBEX-Lo), с целью обнаружения сигнала от вторичной компоненты атомов кислорода и определения параметров этой компоненты.
2. Исследование распределения захваченных протонов за гелиосферной ударной волной и получение количественных оценок его характеристик на основе данных, собранных на КА IBEX (прибор IBEX-Hi), о потоках ЭНА водорода из внутреннего ударного слоя.
3. Анализ данных по интенсивности рассеянного солнечного Лайман- α излучения от геокороны, полученных прибором SWAN/SOHO, исследование распределения атомов водорода в экзосфере Земли и оценка ее протяженности.

Научная новизна

1. Впервые дано теоретическое обоснование особенности, наблюдаемой в данных IBEX-Lo. Показано, что она формируется потоком вторичной компоненты межзвездных атомов водорода, образующейся на границе гелиосферы вследствие процесса перезарядки. Впервые была разработана кинетическая модель распределения межзвездных атомов кисло-

рода по скоростям в гелиосфере, которая учитывает вторичную компоненту атомов кислорода и позволяет вычислять функцию распределения частиц в области сверхзвукового солнечного ветра с любой требуемой точностью.

2. Впервые были получены количественные оценки параметров энергичной популяции захваченных протонов за гелиосферной ударной волной. Разработанная автором модель распределения захваченных протонов в гелиосфере на данный момент не имеет аналогов. Новизна и оригинальность модели состоит в детальном кинетическом подходе при моделировании захваченных протонов в трехмерной и нестационарной постановке.
3. Впервые показано, что геокорона простирается до расстояний ~ 100 радиусов Земли (R_E), что значительно превышает все предыдущие оценки и охватывает орбиту Луны. Впервые восстановлены профили концентрации атомов водорода в экзосфере на основе данных измерений Лайман- α излучения прибором SWAN/SOHO.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Подтверждено наличие вторичной компоненты кислорода и показано, что параметры этой компоненты хорошо согласуются с параметрами вторичного кислорода, которые получены теоретически (в рамках глобальной модели гелиосферы). Таким образом, получено еще одно экспериментальное доказательство существования области гелиосферного ударного слоя и того, что имеющиеся в настоящее время теоретические представления о гелиосфере являются верными.

Разработанная в диссертации модель распределения межзвездных атомов кислорода представляет собой эффективный инструмент, который позволяет вычислять функцию распределения по скоростям и потоки частиц с любой требуемой точностью. Модель может быть естественным образом расширена для исследования распределений других сортов нейтральных частиц (таких как водород и гелий), проникающих в гелиосферу из межзвездной среды, с целью вычисления их потоков и симуляции наблюдений для различных положений КА и характеристик прибора. Таким образом, данная модель может быть использована

для определения и постановки научных задач будущих российских и зарубежных космических миссий по измерению нейтральных частиц в космическом пространстве.

2. Проведенный в работе анализ данных IBEX-Ni позволил выполнить удаленную диагностику свойств границы гелиосферы и, в частности, восстановить функцию распределения захваченных протонов за гелиосферной ударной волной. Между данными наблюдений потоков ЭНА и теоретическими предсказаниями модели получено хорошее качественное соответствие, которое подтверждает валидность используемой глобальной модели гелиосферы Izmodenov & Alexashov [2015, 2020].

Полученные в диссертационной работе количественные оценки параметров энергичной популяции захваченных протонов за гелиосферной ударной волной могут быть использованы для верификации других моделей, имитирующих ускорение ионов на ударных волнах.

3. Проведенное в работе исследование экзосферы Земли на основе данных наблюдений SWAN/SOHO и численной модели позволило оценить протяженность геокороны и дать теоретическую оценку величине дополнительного Лайман- α излучения от экзосферы. С инженерной точки зрения геокорона может являться нежелательным источником рассеянного Лайман- α излучения для космической обсерватории, проводящей наблюдения Вселенной в дальнем ультрафиолетовом диапазоне, поэтому полученные оценки будут полезны при планировании наблюдений будущих космических телескопов на орбите вокруг Земли, Луны или точек Лагранжа L_1 и L_2 .

Методология и методы исследования

В диссертационной работе моделирование проводится в рамках кинетической теории газов. В каждой из рассмотренных глав решается кинетическое уравнение для функции распределения частиц по скоростям в трёхмерной нестационарной постановке. В рассмотренных в работе постановках кинетическое уравнение является линейным дифференциальным уравнением в частных производных первого порядка и решается методом характеристик.

Результаты и положения, выносимые на защиту

1. Проведен анализ данных, полученных на КА IBEX (прибор IBEX-Lo), с использованием кинетической модели распределения межзвездных атомов кислорода в гелиосфере и выполнено численное моделирование потоков атомов на орбите Земли. **Впервые дано теоретическое объяснение наблюдаемой в данных IBEX-Lo особенности в карте потоков атомов кислорода. Показано, что эта особенность формируется из-за наличия вторичной компоненты межзвездного кислорода, образующейся на границе гелиосферы вследствие процесса перезарядки.** Сравнение результатов расчетов с данными прибора IBEX-Lo показало количественное соответствие (в рамках погрешности калибровки прибора). Проведенный параметрический анализ карт потоков вторичного межзвездного кислорода на орбите Земли позволил дать оценку моментам функции распределения (вектору средней скорости и кинетическим температурам) этой популяции в окрестности гелиосферной ударной волны на основе данных наблюдений прибора IBEX-Lo.
2. Проведен анализ карт неба глобально распределенных потоков ЭНА, полученных прибором IBEX-Hi на КА IBEX. Анализ проводился на основе трехмерной нестационарной кинетической модели распределения захваченных протонов и ЭНА в гелиосфере. **Показано, что потоки ЭНА из внутреннего ударного слоя крайне чувствительны к виду функции распределения захваченных протонов по скоростям.** Выполнено параметрическое исследование на основе данных наблюдений IBEX-Hi и численной модели и впервые были **получены количественные оценки на параметры функции распределения энергичной компоненты захваченных протонов по скоростям за гелиосферной ударной волной для различных направлений.** Между данными наблюдений потоков ЭНА и теоретическими предсказаниями модели получено хорошее качественное соответствие.
3. Проведен детальный анализ данных прибора SWAN/SOHO рассеянного солнечного Лайман- α излучения в водородной экзосфере Земли и было **показано, что геокорона простирается, по меньшей мере, до $\sim 100 R_E$ с интенсивностью ~ 5 Рэлей, что значительно превышает**

предыдущие оценки и охватывает орбиту Луны ($\sim 60 R_E$). Выполнено сравнение наблюдаемого прибором SWAN/SOHO Лайман- α излучения от геокороны с другими данными наблюдений. На основе кинетической модели распределения атомов водорода в экзосфере и данных SWAN/SOHO были восстановлены профили концентрации водорода в экзосфере: на больших расстояниях от Земли концентрация пропорциональна $1/r^3$ и составляет ~ 5 , 0.3 и 0.04 атомов/ см^3 на расстояниях 20 , 50 и $100 R_E$, соответственно.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием классической кинетической теории при построении математических моделей, тестированием программ на примерах задач, имеющих известные аналитические решения, согласованием ряда полученных в работе результатов с экспериментальными данными и результатами исследований по данной тематике, опубликованными в научной литературе ранее. Дополнительно стоит отметить, что:

1. Для моделирования распределения атомов кислорода использовался необходимый в данном случае кинетический подход, что обусловлено большой длиной свободного пробега атомов кислорода, сравнимой с характерным размером гелиосферы. Граничное условие в модели (на расстоянии 70 а.е. от Солнца) получено на основе результатов расчетов глобальной самосогласованной кинетико-магнитогидродинамической (кинетико-МГД) модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой Izmodenov & Alexashov [2015], которая, в свою очередь, позволяет объяснить множество экспериментальных данных, собранных различными космическими аппаратами.
2. Модель распределения захваченных протонов в области сверхзвукового солнечного ветра тестировалась на известном аналитическом решении Vasyliunas & Siscoe [1976]. Для этого дополнительно были проведены расчеты с использованием «холодной модели» распределения атомов водорода в гелиосфере в предположении стационарности и изотропности солнечного ветра.
3. Распределение концентрации атомов водорода в экзосфере Земли, по-

лученное в рамках численной модели в случае отсутствия силы солнечного радиационного давления и ионизации, сравнивалось с предсказанием классической аналитической модели Chamberlain [1963].

При построении всех численных моделей проводилось дополнительное тестирование программ с целью выявления наиболее оптимальных параметров расчетных сеток и шагов интегрирования.

Апробация работы

Результаты исследований, вошедших в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на научно-исследовательских семинарах кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (зав. кафедрой – д.ф.-м.н., проф. Краснобаев К. В.) и семинарах лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН (рук. – д. ф.-м. н., проф. Баранов В. Б.). Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе на:

- международном научном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, 2015 – 2018 гг.);
- конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, г. Москва, 2016, 2019 – 2021 гг.);
- конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, г. Москва, 2016 – 2022 гг.);
- конференции «Ломоносовские чтения» (МГУ имени М. В. Ломоносова, г. Москва, 2016, 2019, 2020 гг.);
- всероссийской школе-семинаре «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (ИПМех РАН, г. Москва, 2017 г.);
- 42-й научной ассамблее COSPAR (г. Пасадена, США, 2018 г.);
- 15-й международной конференции «Solar Wind» (г. Брюссель, Бельгия, 2018 г.);

- конференции «EPSC-DPS Joint Meeting» (г. Женева, Швейцария, 2019 г.);
- форуме международного института космических исследований ISSI-VJ «Exploration of outer heliosphere and nearby interstellar medium» (г. Пекин, Китай, 2019 г.);
- конференции Европейского Геофизического Общества (EGU) (г. Вена, Австрия, 2020 г.);
- конференции международных математических центров мирового уровня (г. Сочи, Россия, 2021 г.);

Публикации и личный вклад автора

Положения, выносимые на защиту, основаны на работах [1 – 5] из списка публикаций автора по теме диссертации, вклад автора в которые является основным. Всего соискателем опубликовано 9 статей в рецензируемых международных журналах из перечня ВАК, включая 8 статей в журналах первого квартиля (Q1) международной базы Web of Science (WoS). Все публикации соответствуют теме диссертации.

Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации. Физические постановки задач, рассмотренных в диссертационной работе, принадлежат научному руководителю, а исследования и результаты – соискателю. Соискателем осуществлялись: математические постановки всех задач, рассматриваемых в диссертации, разработка и тестирование численных программ, проведение расчетов, анализ полученных результатов, сравнение результатов с экспериментальными данными, подготовка и написание текстов публикаций, взаимодействие с редакциями журналов и рецензентами.

Структура и объем диссертации

Общий объем диссертации, состоящей из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений, составляет 182 страницы. В работе содержится 47 иллюстраций. Список используемой литературы состоит из 149 библиографических ссылок.

Краткое содержание работы

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

В **главе 1** приведено исследование особенностей распределения межзвездных атомов кислорода в гелиосфере, а также их потоков, регистрируемых прибором IBEX-Lo, на основе разработанной автором кинетической модели.

В **разделе 1.1** представлено введение к главе 1: дано теоретическое описание процесса проникновения межзвездного кислорода в гелиосферу, представлено краткое описание наблюдений прибора IBEX-Lo, который вместе с потоками атомов кислорода измеряет и потоки неона (ввиду того, что их энергии близки), а также сформулированы цели исследования, проведенного в главе 1.

В **разделе 1.2** представлено математическое описание кинетической модели распределения межзвездных атомов кислорода и неона в гелиосфере, которая использовалась в расчетах. В **подразделе 1.2.1** приводятся основные уравнения для описания распределения атомов в гелиосфере. Кинетическое уравнение для функции распределения атомов по скоростям $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ записывается следующим образом:

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)}{\partial \mathbf{v}} = -\beta(\mathbf{r}, t)f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t),$$

где \mathbf{v} – индивидуальная скорость атома кислорода (неона), \mathbf{r} – радиус-вектор, а t – время. На атом кислорода (неона) массы m действует сила гравитационного притяжения со стороны солнца \mathbf{F} . Правая часть этого уравнения выражает потерю частиц за счет процессов ионизации, где $\beta(\mathbf{r}, t)$ является суммарной частотой ионизации, вызванной перезарядкой на протонах солнечного ветра, фотоионизацией или электронным ударом. При расчетах была использована упрощенная модель ионизации, а именно считалось, что эффективные частоты ионизации атомов кислорода и неона на 1 а.е. постоянны и не зависят от времени и гелиошироты (в **Приложении А.1** дано обоснование данному упрощению). Данная модель является трехмерной версией классической горячей модели со специальными граничными условиями. В **подразделе 1.2.2** представлены используемые в работе граничные условия (на сфере

радиуса 70 а.е.), которые получены на основе результатов расчетов самосогласованной трехмерной кинетико-МГД модели взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой Izmodenov & Alexashov [2015]. Поскольку кинетическое уравнение является линейным дифференциальным уравнением в частных производных, то оно может быть решено методом характеристик, который используется в работе и описан в подразделе 1.2.3.

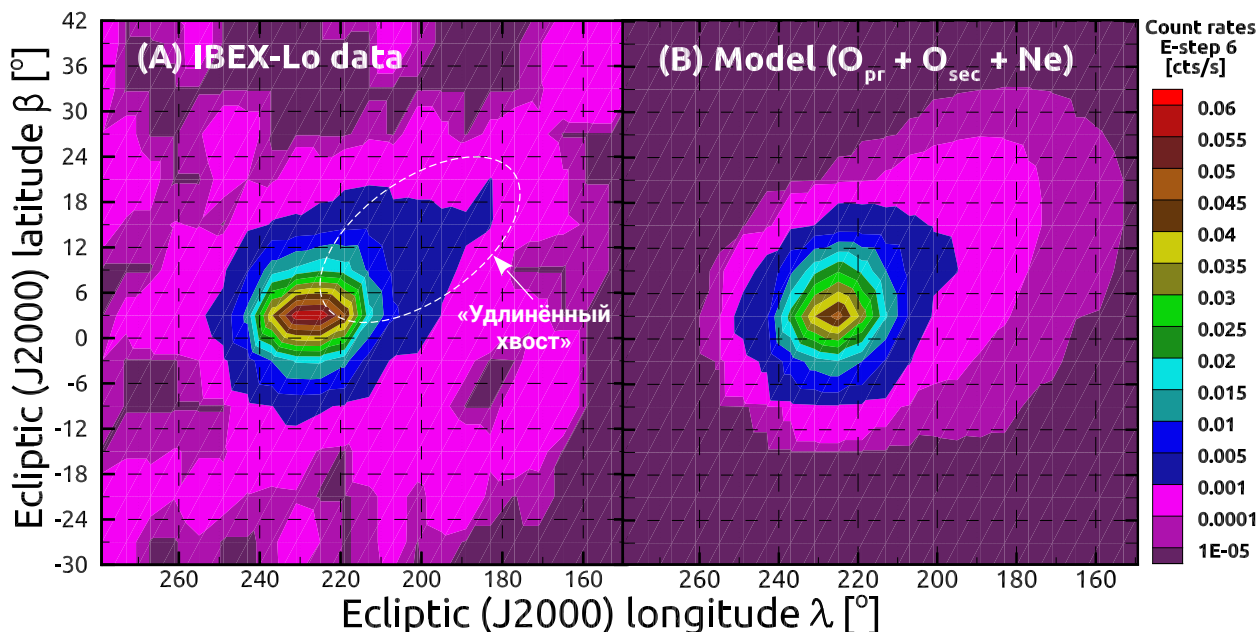


Рисунок 2. Сравнение данных IBEX-Lo (A) с результатами численных расчетов (B) на шестом энергетическом канале (~ 0.6 кэВ). Карты потоков приведены в эклиптических (J2000) координатах.

Раздел 1.3 представляет результаты численных расчетов и их сравнение с данными IBEX. В подразделе 1.3.1 приведены карты модельных потоков первичных и вторичных атомов кислорода, а также атомов неона. Показано, что карты потоков первичного кислорода и неона выглядят качественно одинаково, а на карте потоков вторичной (замедленной и нагретой) компоненты межзвездного нейтрального кислорода наблюдается ярко выраженный «хвост» в области меньших долгот и больших широт относительно максимума потоков. В подразделе 1.3.2 проводится прямое сравнение результатов расчетов с данными наблюдений прибора IBEX-Lo. Рисунок 2A показывает карту потоков межзвездных атомов кислорода и неона по данным IBEX-Lo на шестом энергетическом канале (~ 0.6 кэВ), а Рисунок 2B – карту по результатам численных расчетов (способ вычисления потоков в рамках численной модели описан в **Приложении А.4**). Сравнение этих карт показывает, что

«удлиненный хвост» заметен на обеих картах, и модельные расчеты хорошо воспроизводят данные IBEX-Lo. Детальное количественное сравнение также показало, что различия укладываются в 35%-погрешность калибровки прибора. Таким образом, результаты расчетов подтвердили вывод, сделанный в работе Park et al. [2015], о том, что «хвост» связан со вторичной компонентой межзвездных атомов кислорода. Замечено, что «хвост» в данных IBEX-Lo более вытянут в сторону меньших долгот по сравнению с модельным «хвостом», более интенсивен по величине потоков, а также имеет немного другую геометрию. Эти различия могут являться следствием того, что направление вторичной компоненты на границе расчетной области (в окрестности гелиосферной ударной волны) отличается от направления, полученного в рамках глобальной модели.

В связи с тем, что исследование «удлиненного хвоста» имеет особенный интерес, в **разделе 1.4** дополнительно был проведен анализ зависимости геометрии и структуры «хвоста» от моментов функции распределения вторичной компоненты межзвездных атомов кислорода на граничной сфере радиуса 70 а.е. Были сделаны качественные заключения о том, как необходимо изменить распределение вторичной компоненты на границе для того, чтобы нивелировать различия между модельными расчетами и данными наблюдений.

В **разделе 1.5** диссертации приводится заключение к главе 1.

В **главе 2** диссертации проводится анализ потоков ЭНА водорода из области внутреннего ударного слоя, наблюдаемых прибором IBEX-Hi. На основе разработанной автором численной модели исследовалось распределение захваченных протонов в гелиосфере и, в частности, распределение по скоростям их энергичной компоненты за гелиосферной ударной волной.

В **разделе 2.1** содержится введение к главе 2. В **разделе 2.2** приводится метод вычисления потоков ЭНА. Первичные ЭНА, которые формируют глобально распределенный поток, рождаются при перезарядке между протонами и межзвездными атомами водорода во внутреннем ударном слое. Поток ЭНА является интегралом вдоль луча зрения от источникового члена, ответственного за рождение ЭНА. Источники пропорциональны величине функции распределения протонов по скоростям, которая, в свою очередь, складывается из функции распределения протонов солнечного ветра (тепловой компоненты) и функции распределения захваченных протонов (надтепловой компоненты), то есть $f = f_{sw} + f_{pui}$.

В **разделе 2.3** представлено подробное математическое описание мо-

дели распределения захваченных протонов, разработанной в диссертации. В **подразделе 2.3.1** приводятся основные уравнения в рамках кинетического описания распределения захваченных протонов в гелиосфере. Предполагается, что распределение захваченных протонов по скоростям в системе отсчета, связанной с солнечным ветром, изотропно. Кинетическое уравнение для изотропной функции распределения $f_{\text{pui}}^*(t, \mathbf{r}, w)$, где w – скорость захваченного протона в системе отсчета, связанной с солнечным ветром, записывается в общем виде:

$$\frac{\partial f_{\text{pui}}^*}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \frac{\partial f_{\text{pui}}^*}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{w^2} \frac{\partial}{\partial w} \left(w^2 D \frac{\partial f_{\text{pui}}^*}{\partial w} \right) + \frac{w}{3} \frac{\partial f_{\text{pui}}^*}{\partial w} \text{div}(\mathbf{V}) + S(t, \mathbf{r}, w),$$

где \mathbf{V} – средняя скорость плазмы, $D(t, \mathbf{r}, w)$ является коэффициентом энергетической диффузии, а $S = S_+ - f_{\text{pui}}^* S_-$, где S_+ и S_- – члены, которые отвечают за рождение и потери (исчезновение), соответственно, захваченных протонов вследствие процесса перезарядки. В работе рассматривается простая модель и принимается $D = 0$, что соответствует спокойному солнечному ветру, когда уровень флуктуаций магнитного поля низкий, то есть энергетической диффузией пренебрегается. В этом случае кинетическое уравнение становится линейным дифференциальным уравнением первого порядка и может быть решено методом характеристик, который описан в **подразделе 2.3.2**, при этом характеристикой является траектория частицы солнечного ветра. Таким образом, при решении кинетического уравнения методом характеристик траектория захваченного протона восстанавливается назад по времени до точки, близкой к Солнцу, где ставится граничное условие $f_{\text{pui}}^* = 0$. В рамках кинетической теории по известному значению функции распределения захваченных протонов по скоростям могут быть вычислены также и моменты функции распределения – выражения для концентрации и температуры приведены в **подразделе 2.3.3**. При пересечении захваченным протоном гелиосферной ударной волны используется специальное условие перехода, описанное в **подразделе 2.3.4**, которое основано на использовании теоремы Лиувилля (сохранении фазового потока при переходе через ударную волну), сохранении магнитного момента и предположения о слабом рассеянии за ударной волной. Для проведения расчетов распределения захваченных протонов с использованием модели, описанной в предыдущих разделах, необходимо знать глобальные распределения плазмы и атомов водорода в гелиосфере. В **подразделе 2.3.5** описаны глобальные распределения, используемые в исследовании, которые основаны на результатах расчетов кинетико-МГД

модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой Izmodenov & Alexashov [2020]. В подразделе 2.3.6 приведены результаты расчетов распределения захваченных протонов в гелиосфере на основе разработанной кинетической модели и сравнение с классическим аналитическим решением Vasyliunas & Siscoe [1976].

Используемая в расчетах модель гелиосферы Izmodenov & Alexashov [2020] рассматривает плазму в рамках идеальной МГД и использует одножидкостной подход. Таким образом, в расчетах плазма представляет собой смесь протонов СВ/ЛМС, захваченных протонов, электронов, α -частиц в солнечном ветре и ионов гелия в ЛМС. В разделе 2.4 описан метод разделения плазмы (смеси заряженных частиц) на компоненты на основе глобального распределения плазмы в гелиосфере и модели распределения захваченных протонов.

В разделе 2.5 представлены результаты численных расчетов и их сравнение с данными IBEX-Hi. Показано, что между результатами расчетов нестационарной модели и данными наблюдается качественное соответствие – модель способна воспроизводить геометрию многодолевой структуры потоков. В среднем диапазоне энергий ($\sim 1\text{--}2$ кэВ) присутствует и количественное соответствие. На более высоких энергиях, а именно на энергетических каналах 5 и 6 (~ 2.73 и 4.29 кэВ), в модельных расчетах наблюдается дефицит потоков (особенно из носовой области гелиосферы), вызванный тем, что в используемой модели не учитывается существование энергичной популяции захваченных протонов, которая образуется в процессе стохастического ускорения при взаимодействии с турбулентностью солнечного ветра и/или отражения от гелиосферной ударной волны.

Таким образом, основным ограничением модели, разработанной в предыдущих разделах, является отсутствие процессов, которые производят высокоэнергетический «хвост» в распределении захваченных протонов по скоростям. В работе не изучались физические процессы в гелиосфере, которые ответственны за образование высокоэнергетического «хвоста» в распределении захваченных протонов по скоростям, но ставилась цель – дать количественные оценки параметрам популяции энергичных захваченных протонов за ударной волной. В разделе 2.6 приведено исследование того, как дополнительная энергетическая популяция захваченных протонов влияет на моделируемые потоки ЭНА, и даны оценки количественным характеристикам энергичной компоненты захваченных протонов за гелиосферной ударной волной

на основе данных наблюдений IBEX-Ni. Подраздел 2.6.1 описывает модель распределения захваченных протонов, которая учитывает их энергичную популяцию. В работе были рассмотрены два сценария с модификацией распределения захваченных протонов по скоростям за ударной волной: (1) распределение «заполненной оболочки» со степенным «хвостом» ($f_{\text{tail}}^*(w) \propto w^{-\eta}$, где η – спектральный индекс), который описывает дополнительную энергичную популяцию захваченных протонов, и (2) би-максвелловское распределение. В подразделе 2.6.2 описан алгоритм аппроксимации данных IBEX-Ni с использованием модели.

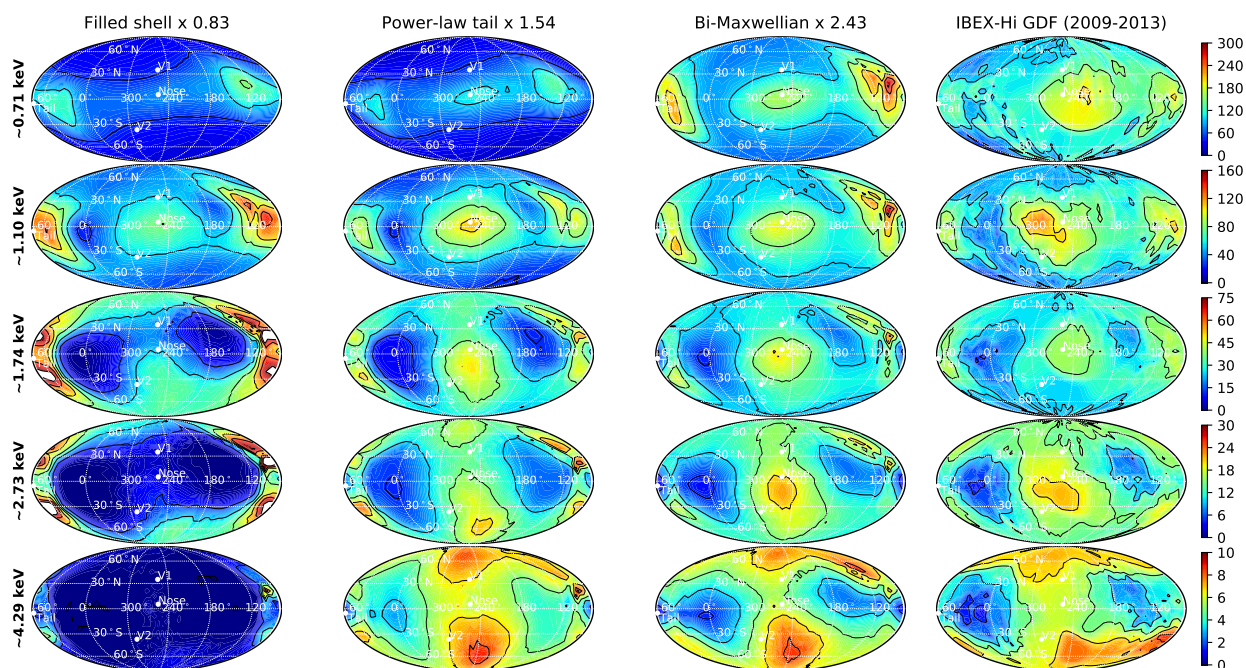


Рисунок 3. Полные карты неба (в эклиптических координатах J2000) потоков ЭНА, наблюдаемые прибором IBEX-Ni на энергетических каналах 2 – 6 (по строкам). В первом столбце приведены результаты расчетов без учета дополнительной энергичной популяции захваченных протонов, во втором и третьем – результаты расчетов в рамках сценариев «степенного хвоста» и «би-максвелловского» распределений сразу за ударной волной, соответственно (с использованием наилучших параметров аппроксимации). В четвертом столбце представлены данные IBEX-Ni (осредненные за 2009 – 2013 гг). Единицы измерения потоков – $(\text{см}^2 \text{ ср с кэВ})^{-1}$.

В подразделе 2.6.3 представлены результаты параметрического исследования, в ходе которого варьировались параметры энергичной компоненты (в рамках обоих сценариев) в широком диапазоне значений с целью минимизации разницы между результатами численных модельных расчетов и данными.

Разница между данными и модельными расчетами описывалась в терминах приведенной χ^2 статистики. Были определены наиболее подходящие параметры аппроксимации энергичной популяции захваченных протонов для различных положений за ударной волной (в направлениях набегающего потока ЛМС, противоположного ему направления, флангов гелиосферы и солнечных полюсов). Сделан вывод о том, что энергетический спектр захваченных протонов наиболее пологий в направлении полюсов Солнца, и захваченные протоны сильнее нагреваются в хвостовом направлении гелиосферы. Карты потоков ЭНА, полученные при помощи модели, учитывающей энергичную популяцию захваченных протонов, качественно согласуются с данными наблюдений (см. Рисунок 3). Дополнительная популяция энергичных захваченных протонов обеспечивает более интенсивные потоки на высоких энергетических каналах, что лучшим образом соответствует данным IBEX-Hi. Таким образом, было сделано заключение, что глобально распределенные потоки чувствительны к форме функции распределения захваченных потоков по скоростям во внутреннем ударном слое, и учет энергичной популяции захваченных протонов необходим для объяснения данных. Для количественного соответствия с данными модельные потоки должны быть значительно масштабированы (умножены на 1.54 и 2.43 в сценариях «степенного хвоста» и би-максвелловского распределения, соответственно), что может являться индикатором недостатка атомов водорода в используемой модели гелиосферы.

Раздел 2.7 содержит выводы и заключение к главе 2.

В **главе 3** приведено исследование распределения атомов водорода в экзосфере Земли. В главе представлены результаты моделирования рассеянного солнечного Лайман- α излучения от геокороны и сравнение с экспериментальными данными прибора SWAN на КА SOHO. Глава 3 состоит из следующих разделов.

В **разделе 3.1** содержится введение к главе 3, приводится исторический обзор работ, связанных с измерением и исследованием рассеянного солнечного Лайман- α излучения от атомов водорода в экзосфере Земли.

В **разделе 3.2** представлено краткое описание наблюдений, выполненных прибором SWAN на борту SOHO. Отличительной чертой прибора является наличие водородной ячейки, которая размещена на оптическом пути и заполнена H_2 газом, полностью прозрачным для Лайман- α излучения. При электрическом нагреве две вольфрамовые нити диссоциируют молекулы на атомы, создавая внутри ячейки облако атомов водорода, которое рассеива-

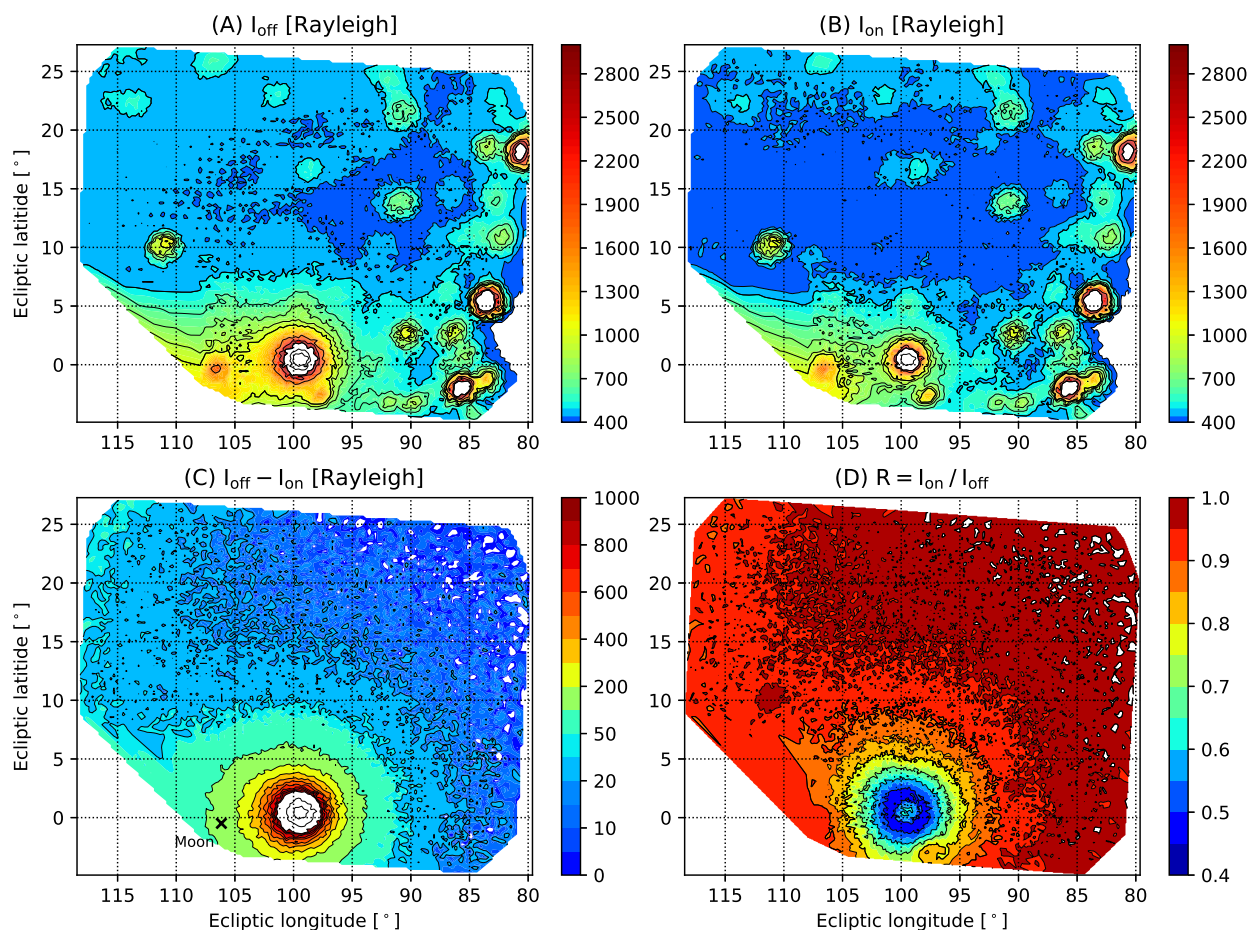


Рисунок 4. Данные SWAN/SOHO за 24 января 1997 г. Панель (A) показывает интенсивность I_{off} , измеренную с выключенной водородной ячейкой, панель (B) – интенсивность I_{on} , наблюдаемую с водородной ячейкой в активном состоянии, панель (C) – разность ($I_{\text{off}} - I_{\text{on}}$) карт (A) и (B), а панель (D) – коэффициент редукции $R = I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$. Белые области возникают из-за превышения верхнего предела цветовой шкалы. Направление на Луну отмечено черным крестиком на панели (C).

ет Лайман- α фотоны вблизи центра линии. Такой «поглощающий» фильтр позволяет исследовать также и спектральные характеристики наблюдаемого излучения. Для заданного направления обзора наблюдения проводились с ячейкой и в выключенном и во включенном состояниях, в результате чего были измерены интенсивности I_{off} и I_{on} , соответственно. Геометрия наблюдений SWAN позволяет строить полные карты неба в интенсивности Лайман- α излучения с частотой в 1-2 дня. В этом разделе также детально описаны специальные (с улучшенным разрешением по углу) наблюдения геокороны, которые проводились SWAN/SOHO в январе 1996, 1997 и 1998 гг. На Рисунке 4 показаны данные, полученные 24 января 1997 г., в виде четырех карт

неба: панель (А) представляет интенсивность I_{off} с выключенной водородной ячейкой, панель (В) – интенсивность I_{on} с водородной ячейкой в активном состоянии, панель (С) показывает разницу $I_{\text{off}} - I_{\text{on}}$ двух предыдущих карт интенсивности, а панель (D) – коэффициент редукции $R = I_{\text{on}}/I_{\text{off}}$. Таким образом, использование водородной ячейки позволяет определить разность $I_{\text{off}} - I_{\text{on}}$, вызванную только излучением от геокороны, так как излучение от межзвездных атомов водорода (межпланетный фон) имеет значительный доплеровский сдвиг относительно центра линии Лайман- α .

Раздел 3.3 описывает кинетическую модель распределения атомов водорода в экзосфере Земли. В разделе рассматриваются силы, действующие на атомы водорода в экзосфере и даются оценки их величинам, в результате чего делается вывод о том, что определяющими являются сила гравитационного притяжения со стороны Земли и сила солнечного радиационного отталкивания. В рамках модели учитываются потери частиц за счет процесса ионизации (вызванного перезарядкой атомов с протонами, фотоионизацией или электронным ударом), а изменением числа частиц из-за упругих столкновений пренебрегается (ввиду большой длины свободного пробега атомов в экзосфере). В **подразделе 3.3.1** описывается метод характеристик, позволяющий решить кинетическое уравнение для функции распределения частиц по скоростям. Граничное условие в модели ставится на нижней границе экзосферы (экзобазе) на высоте 500 км над поверхностью Земли в виде максвелловского распределения по скоростям с заданной концентрацией n_{exo} , температурой T_{exo} , и нулевой средней скоростью, что подробно описано в **подразделе 3.3.2**.

В **разделе 3.4** приведено детальное сравнение данных наблюдений прибора SWAN с результатами численных расчетов и другими наблюдениями. В **подразделе 3.4.1** проводится сравнение данных с результатами численных расчетов на основе разработанной модели распределения атомов водорода в экзосфере. Для вычисления рассеянного Лайман- α излучения от геокороны использовалась модель переноса излучения в приближении оптически тонкой среды (в этом случае интенсивность пропорциональна интегралу от концентрации атомов водорода вдоль луча зрения). На Рисунке 5 представлена зависимость разности интенсивностей $I_{\text{off}} - I_{\text{on}}$, полученная благодаря данным поглощения водородной ячейки, от параметра проникновения p , который равен длине перпендикуляра от центра Земли до луча зрения: черные точки показывают данные SWAN, красная сплошная линия – усредненные данные, синяя и голубая пунктирные линии – результаты моделирования без

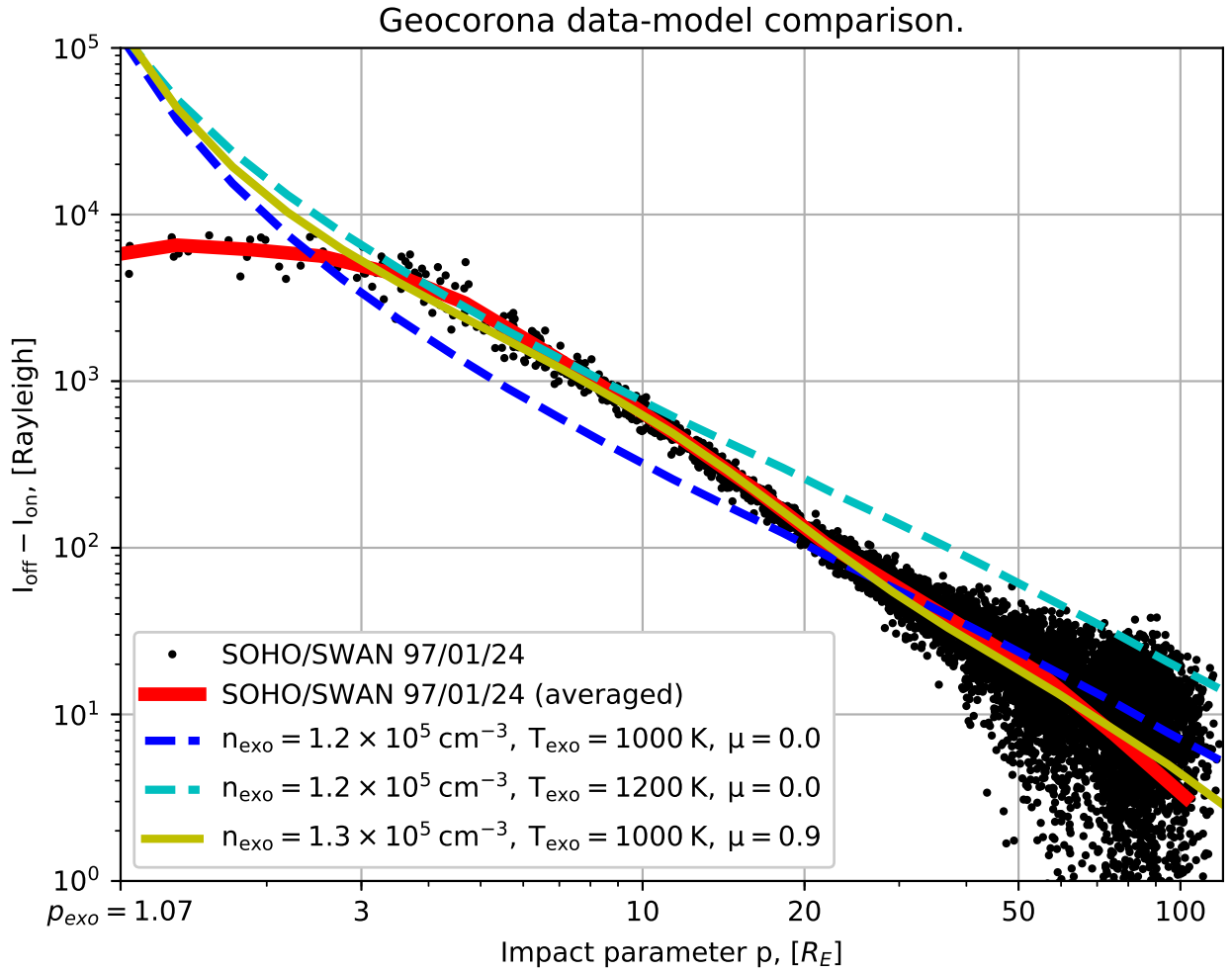


Рисунок 5. Зависимость разности интенсивностей ($I_{\text{off}} - I_{\text{on}}$) от параметра проникновения p : черными точками показаны данные SWAN, полученные 24 января 1997 г., красная сплошная линия – усредненные данные, синяя и голубая пунктирные линии – результаты моделирования (без учета силы солнечного радиационного давления) с различными значениями температуры ($T_{\text{exo}} = 1000 \text{ K}$ и $T_{\text{exo}} = 1200 \text{ K}$) на экзобазе. Желтой сплошной линией показан результат расчетов с учетом силы солнечного давления.

учета силы радиационного давления с различными температурами на экзобазе, желтая сплошная линия – расчеты модели, учитывающей силу солнечного радиационного давления. Рисунок 5 позволяет заключить, что расчеты модели без учета радиационного давления (синяя и голубая кривые) не могут воспроизводить данные и на малых и на больших расстояниях одновременно. В то же время имеется хорошее количественное соответствие между данными SWAN/SOHO и расчетами модели с учетом силы радиационного давления (желтая сплошная линия) в диапазоне параметров проникновения от 3 до 30–

$50 R_E$, где относительная выпуклость интенсивности вызвана влиянием силы солнечного радиационного давления. Таким образом, только модель с учетом радиационного давления дает хорошее соответствие с данными. Рисунок 5 также позволяет заметить значительную протяженность геокороны до расстояний $\sim 100 R_E$, что примерно в два раза превышает расстояние от Земли до Луны. В подразделе 3.4.2 описываются две стратегии, позволяющие определить Лайман- α излучение только от геокороны по данным SWAN/SOHO:

1. Первая стратегия основана на использовании модели экзосферы. Интенсивность рассеянного солнечного Лайман- α излучения от геокороны $I_{g,off}$ может быть вычислена по формуле:

$$I_{g,off} = \frac{I_{off} - I_{on}}{1 - R^M},$$

где $R^M = I_{g,on}^M / I_{g,off}^M$ – коэффициент редукции, который вычислялся при помощи модели экзосферы, а $I_{off} - I_{on}$ есть разность интенсивностей по данным наблюдений SWAN/SOHO.

2. Вторая стратегия основана на оценке величины межпланетного Лайман- α фона. Из наблюдаемых интенсивностей вычитался фон, который либо (а) считался равномерным (не зависящим от направления на карте неба), либо (б) вычислялся с использованием модели распределения атомов водорода в гелиосфере. Стоит отметить, что второй вариант более приемлем, потому как величина межпланетного фона не является равномерно распределенной на всем участке карты неба, охватывающем геокорону. Для расчета межпланетного фона была использована модель распределения водорода в гелиосфере, описанная в работе Katushkina et al. [2015] с граничным условием на расстоянии 70 а.е. от Солнца, которое получено на основе результатов расчетов глобальной модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой Izmodenov & Alexashov [2015].

В подразделе 3.4.3 полученные интенсивности Лайман- α излучения от геокороны по данным SWAN от 24 января (1996, 1997, 1998 гг.) сравнивались с измерениями OGO-5 (1968 г.) и с более поздним (2015 г.) изображением геокороны, полученным LAICA (Lyman Alpha Imaging Camera) на КА PROCYON [Kameda et al., 2017]. Показано, что столбовые (интегрированные вдоль луча зрения) концентрации атомов водорода, измеренные SWAN в период солнечного минимума при $p = 7 R_E$, в 1.1 – 2.5 раза больше, чем измеренные

LAICA и OGO-5 в период солнечного максимума. На основе этого сделано предположение, что значительная часть наблюдаемых атомов водорода может находиться на спутниковых орбитах, которые в период солнечного максимума могут быстрее возвращаться на экзобазу и быть более подвержены ионизации.

В разделе 3.5 описан алгоритм восстановления профиля концентрации атомов водорода в экзосфере по измеренным интенсивностям Лайман- α излучения, а также представлено сравнение модельных расчетов с профилями концентрации атомов водорода в экзосфере на основе данных SWAN. В случае оптически тонкой среды наблюдаемая интенсивность пропорциональна столбовой концентрации $N(p)$ атомов водорода вдоль рассматриваемого луча зрения. В предположении сферической симметрии геокороны была определена зависимость концентрации $n(r)$, где r – расстояние до центра Земли, по измеренной зависимости $N(p)$ с использованием метода «очистки луковицы».

В разделе 3.6 дано заключение к главе 3, а также приведены обсуждения и выводы.

Завершающий диссертацию раздел под названием «**Заключение**» содержит основные результаты и выводы проделанной работы.

Список публикации автора по теме диссертации

1. **Balyukin I. I.**, Izmodenov V. V., Katushkina O. A., Alexashov D. B. «Kinetic modelling of primary and secondary interstellar oxygen atom fluxes in the heliosphere» // Journal of Physics: Conference Series, 2017, 815, 012028, DOI: 10.1088/1742-6596/815/1/012028
2. **Baliukin I. I.**, Izmodenov V. V., Möbius E., Alexashov D. B., Katushkina O. A., Kucharek H. «Secondary Interstellar Oxygen in the Heliosphere: Numerical Modeling and Comparison with IBEX-Lo Data» // The Astrophysical Journal, 2017, 850, 119, DOI: 10.3847/1538-4357/aa93e8
3. **Baliukin I. I.**, Bertaux J.-L., Quemerais E., Izmodenov V. V., Schmidt W. «SWAN/SOHO Lyman- α Mapping: The Hydrogen Geocorona Extends Well Beyond the Moon» // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2019, 124, 861–885, DOI: 10.1029/2018JA026136
4. **Baliukin I. I.**, Izmodenov V. V., Alexashov D. B. «Heliospheric energetic neutral atoms: Non-stationary modelling and comparison with IBEX-Hi

- data» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2020, 499(1), 441–454, DOI: 10.1093/mnras/staa2862
5. **Baliukin I. I.**, Izmodenov V. V., Alexashov D. B. «Energetic pickup proton population downstream of the termination shock as revealed by IBEX-Hi data» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 509(4), 5437–5453, DOI: 10.1093/mnras/stab3214
 6. Katushkina O. A., **Baliukin I. I.**, Izmodenov V. V., Alexashov D.B. «Imprints of the secondary interstellar hydrogen atoms at 1 AU» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 504, 2501–2508, DOI: 10.1093/mnras/stab944
 7. Kornbleuth M., Opher M., **Baliukin I. I.**, Dayeh M. A., Zirnstern E., Gkioulidou M., Dialynas K., Galli A., Richardson J. D., Izmodenov V. V. «Signature of a heliotail organized by the solar magnetic field and the role of non-ideal processes in modeled IBEX ENA maps: comparison of the BU and Moscow MHD models» // The Astrophysical Journal, 2021, 921, 164, DOI: 10.3847/1538-4357/ac1e2a
 8. Kornbleuth M., Opher M., **Baliukin I. I.**, Gkioulidou M., Richardson J. D., Zank G. P., Michael A. T., Toth G., Tenishev V., Izmodenov V. V. «The development of a split-tail heliosphere and the role of non-ideal processes: a comparison of the BU and Moscow models» // The Astrophysical Journal, 2021, 929, 179, DOI: 10.3847/1538-4357/ac2fa6
 9. Connor H. K., Sibeck D. G., Collier M. R., **Baliukin I. I.**, Branduardi-Raymont G., Brandt P. C., et al. «Soft X-ray and ENA Imaging of the Earth’s Dayside Magnetosphere» // Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2021, 126, DOI: 10.1029/2020JA028816
 10. Sokol J. M., Kucharek H., **Baliukin I. I.**, Fahr H., Izmodenov V. V., Kornbleuth M., Mostafavi P., Opher M., Park J., Pogorelov N., Quinn P., Smith C., Zank G., Zhang M. «Interstellar Neutrals, Pickup Ions, and Energetic Neutral Atoms Throughout the Heliosphere: Present Theory and Modeling Overview» // Space Science Reviews, 2022 (*принята к публикации*)

Список цитируемой литературы

- Chamberlain J. «Planetary coronae and atmospheric evaporation» // *Planetary and Space Science*, 1963, 11(8), 901–960
- Izmodenov V. V., Malama Yu. G., Lallement R. «Interstellar neutral oxygen in a two-shock heliosphere» // *Astronomy & Astrophysics*, 1997, 317, 193–202
- Izmodenov V. V., Lallement R., Geiss J. «Interstellar oxygen in the heliospheric interface: influence of electron impact ionization» // *Astronomy & Astrophysics*, 1999, 344, 317–321
- Izmodenov V. V. «Physics and Gasdynamics of the Heliospheric Interface» // *Astrophysics and Space Science*, 2000, 274, 55
- Izmodenov V. V., Malama Yu. G., Gloeckler G., Geiss J. «Filtration of interstellar H, O, N atoms through the heliospheric interface: Inferences on local interstellar abundances of the elements» // *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 414, L29–L32
- Izmodenov V. V., Alexashov D. B. «Three-dimensional Kinetic-MHD Model of the Global Heliosphere with the Heliopause-surface Fitting» // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 220(2), 32
- Izmodenov V. V., Alexashov D. B. «Magnitude and direction of the local interstellar magnetic field inferred from Voyager 1 and 2 interstellar data and global heliospheric model» // *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 633, L12
- Kameda S., Ikezawa S., Sato M., Kuwabara M., Osada N., Murakami G. «Ecliptic North-South Symmetry of Hydrogen Geocorona» // *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(23), 11706–11712
- Katushkina O. A., Izmodenov V. V., Alexashov D. B. «Direction of interstellar hydrogen flow in the heliosphere: theoretical modelling and comparison with SOHO/SWAN data» // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 446(3), 2929–2943
- McComas D. J., Allegrini F., Bochsler P., et al. «Global Observations of the Interstellar Interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX)» // *Science*, 2009, 326, 959
- Park J., Kucharek H., Möbius E., et al. «Statistical Analysis of the Heavy Neutral Atoms Measured by IBEX» // *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, 220, 34
- Vasyliunas V. M., Siscoe G. L. «On the Flux and the Energy Spectrum of Interstellar Ions in the Solar System» // *Journal of Geophysical Research*, 1976, 81, 7
- Witte M. «Kinetic parameters of interstellar neutral helium. Review of results obtained during one solar cycle with the Ulysses/GAS-instrument» // *Astronomy & Astrophysics*, 2004, 426, 835–844