

**УТВЕРЖДАЮ:**

Декан механико-математического  
факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,  
член-корреспондент РАН, профессор  
А. И. Шафаревич  
2022 г.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**кафедры аэромеханики и газовой динамики  
механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»**

Диссертация «Особенности распределения нейтральных компонент в гелиосфере и экзосфере Земли» выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

В период подготовки диссертации соискатель Балюкин Игорь Игоревич являлся аспирантом очного отделения аспирантуры механико-математического факультета кафедры аэромеханики и газовой динамики МГУ имени М.В. Ломоносова, работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в должности младшего научного сотрудника.

В 2017 г. окончил специалитет механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности 01.05.01 «Фундаментальная математика и механика», в 2021 г. – очную аспирантуру отделения механики механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Измоленов Владислав Валерьевич, профессор кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова.

По результатам рассмотрения диссертации «Особенности распределения нейтральных компонент в гелиосфере и экзосфере Земли» принято следующее заключение:

В работе было проведено исследование особенностей распределения межзвездных атомов кислорода в гелиосфере, а также их потоков, регистрируемых прибором IBEX-Lo на космическом аппарате (КА) IBEX на орбите Земли, с использованием разработанной автором кинетической модели распределения межзвездных атомов. Также изучались потоки энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода из области внутреннего ударного слоя, наблюдаемые прибором IBEX-Hi. В диссертации была предложена и разработана модель, с помощью которой исследовалось распределение захваченных протонов в гелиосфере и, в частности, распределение их энергичной компоненты в окрестности гелиосферной ударной волны. Было изучено распределение атомов водорода во внешней части атмосферы (экзосфере) Земли, проведено моделирование рассеянного солнечного Лайман-альфа

излучения в геокороне (водородной составляющей экзосферы) и выполнено сравнение с экспериментальными данными инструмента SWAN на КА SOHO.

### **Цели работы**

1. Анализ данных, полученных на КА Interstellar Boundary Explorer (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, полученных на КА IBEX (прибор IBEX-Hi), о потоках ЭНА водорода из внутреннего ударного слоя.
3. Анализ данных по интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения от геокороны, полученных прибором SWAN/SOHO, исследование распределения атомов водорода в экзосфере Земли и 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 межзвездной 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 межзвездной 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.

### **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 кислорода 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 геокоорона простирается до расстояний  $\sim 100$  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-альфа 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-Hi 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-альфа излучения от экзосферы. С инженерной точки зрения геокоорона может являться нежелательным источником рассеянного Лайман-альфа 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 L1 и L2.

## Основные 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 для различных положений за гелиосферной ударной волной. Между данными наблюдений потоков ЭНА и теоретическими предсказаниями модели получено хорошее качественное соответствие.
3. Проведен детальный анализ данных SWAN/SOHO рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в водородной экзосфере Земли и было **показано, что геокорона простирается, по меньшей мере, до  $\sim 100 R_E$  с интенсивностью  $\sim 5$  Рэлей, что значительно превышает предыдущие оценки и охватывает орбиту Луны ( $\sim 60 R_E$ ).** Выполнено сравнение наблюдаемого SWAN/SOHO Лайман-альфа 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  $\sim 5, 0.3$  и  $0.04$  атомов/ $см^3$  на расстояниях  $20, 50$  и  $100 R_E$ , соответственно.**

## Степень достоверности 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 Vasylunas & 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, полученное в рамках численной модели в случае отсутствия силы солнечного радиационного давления и ионизации, сравнивалось с предсказанием классической аналитической модели Chamberlain [1963].

### **Личное участие соискателя в получении результатов**

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.

### **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. – 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-BJ «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.)

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.

#### Список публикаций 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., and 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., E. Quemerais, V. V. Izmodenov, and W. Schmidt. «SWAN/SOHO Lyman- $\alpha$  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., Zirnstein E., Gkioulidou M., Dialynas K., Galli A., Richardson J. D., Izmodenov 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. «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

Диссертация Балюкина Игоря Игоревича является законченной научной работой, выполненной на актуальную тему и на высоком научном уровне. Диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям согласно «Положению о присуждении ученых степеней», утвержденному Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.

Диссертация «Особенности распределения нейтральных компонент в гелиосфере и экзосфере Земли» Балюкина Игоря Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.03.03 «Физика Солнца» и 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Заключение принято на заседании кафедры аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». Присутствовало на заседании 12 человек: зав. кафедрой проф. К. В. Краснобаев, уч. секретарь доц. Е. И. Могилевский, профессора В. В. Измоденов, В. Д. Котелкин, Ф. А. Максимов, А. Н. Осипцов, доценты С. И. Арафайлов, А. Н. Белоглазкин, Г. Ю. Котова, ст.н.с. Л. В. Муравлева, н.с. Я. Д. Янков, техник Л. Н. Андреева. Результаты голосования: «за» – 12; «против» – нет; воздержавшихся – нет. Протокол № 2 от 22.03.2022.

Заведующий кафедрой аэромеханики  
и газовой динамики  
механико-математического факультета  
МГУ имени М. В. Ломоносова,  
д. ф.-м. н., профессор



Краснобаев Константин Васильевич