

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова,
начальник Управления научной политики,
д-р физ.-мат. наук., профессор
А.А.Федянин
«3» марта 2025 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 межзвездных пылевых частиц в гелиосфере» выполнена на кафедре аэромеханики и газовой динамики механико-математического факультета ФГБОУ «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

В период подготовки диссертации соискатель Годенко Егор Алексеевич 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 проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) в должности младшего научного сотрудника.

В 2020 г. окончил специалитет механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности 01.05.01 «Фундаментальные математика и механика», в 2024 г. – очную аспирантуру отделения механики механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2024 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 межзвездных пылевых частиц в гелиосфере» принято следующее заключение:

Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационной работы обеспечивается необходимостью корректного (на основе адекватных численных моделей) анализа имеющихся прямых измерений межзвездной пыли (КА Ulysses, New Horizons), а также составления научных программ исследований будущих миссий (Interstellar Probe, Interstellar Express). В настоящий момент также готовится к запуску (запланирован на май 2025 г.) КА Interstellar Mapping and Acceleration Probe (IMAP), на борту которого будет установлен прибор по измерению пыли IDEX, который обладает значительно более совершенными техническими характеристиками, по сравнению с

аналогичными приборами на КА Ulysses и Cassini. Информация, полученная на основе прямых измерений пыли (величины потоков, распределение пылинок по размерам, химический состав), представляет собой большую ценность, поскольку космическая пыль играет существенную роль во множестве физических процессов, происходящих в межзвездном пространстве, таких как: 1) перенос вещества в межзвездной среде, 2) образование сложных (в том числе органических) молекул, 3) формирование протопланетных дисков, 4) рассеивание и поглощение электромагнитного излучения.

В работе впервые показано, что анализ распределения межзвездной пыли в окрестности Солнца может служить новым способом удаленной диагностики параметров ЛМС. Это открывает новый путь для исследования ЛМС и физических процессов на границе гелиосферы.

Помимо этого, изучение распределения пыли в гелиосфере естественным образом связано с более общими исследованиями распределения пыли в произвольных астросферах, что является актуальным вопросом в настоящий момент в связи с большим количеством экспериментальных данных, получаемых современными телескопами, работающими в инфракрасном диапазоне (см., например, James Webb Space Telescope, Wide-field Infrared Survey Explorer). Анализ пылевых оболочек вокруг звезд является на данный момент одним из наиболее перспективных способов исследования свойств соответствующих звездных ветров.

Целью диссертации является исследование особенностей распределения межзвездных пылевых частиц в гелиосфере и на ее границе.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) Изучены особенности распределения межзвездной пыли внутри гелиосферы. В частности, определены области накопления частиц и исследованы механизмы возникновения этих областей. Для этого были разработаны две модели распределения пыли: 1) кинетическая модель, 2) жидкостная модель холодного газа. С помощью разработанных моделей были проведены вычисления для частиц, обладающих различными свойствами, а также для различных конфигураций гелиосферного магнитного поля.
- 2) Исследовано изменение заряда межзвездных пылевых частиц при их движении внутри гелиосферы и в области гелиосферного ударного слоя. Для этого была разработана модель для вычисления заряда пылинок и проведены расчеты для частиц пыли различных размеров. С помощью дополнительных вычислений были определены границы применимости предположения о равновесности заряда пылинок в гелиосфере.
- 3) Изучено влияние гелиосферного ударного слоя на распределение межзвездной пыли. Для этого была разработана кинетическая модель распределения пыли, в которой одновременно учитываются эффекты границ гелиосферы и нестационарность гелиосферного магнитного поля. С помощью построенной модели для частиц различных размеров были проведены вычисления для двух случаев: с учетом и без учета эффектов гелиосферного ударного слоя.
- 4) Исследована чувствительность распределения пыли в окрестности Солнца к изменению параметров ЛМС. Для этого с помощью разработанной кинетической модели были проведены вычисления с использованием различных распределений параметров окружающей плазмы.

Научная новизна

- 1) Впервые были обнаружены области накопления межзвездной пыли, возникающие в окрестности каустик – огибающих траекторий пылевых частиц. С помощью жидкостной модели было показано, что концентрация пыли стремится к бесконечности при приближении к каустикам. В рамках кинетического подхода было исследовано влияние дисперсии скоростей пылевых частиц на формирование данных областей.
- 2) Впервые было установлено, что распределение пыли в окрестности Солнца чувствительно к изменению параметров невозмущенной ЛМС – в частности, к изменению направления межзвездного магнитного поля.
- 3) Впервые было исследовано влияние гелиосферного ударного слоя на распределение пыли в окрестности Солнца. Разработанная для этого кинетическая модель распределения пыли, которая одновременно учитывает эффекты гелиосферного ударного слоя и нестационарность гелиосферного магнитного поля, на данный момент не имеет аналогов в гелиосферном научном сообществе.
- 4) Впервые были проведены оценки времени релаксации электрического заряда пыли при прохождении частиц через границу гелиосферы. Также впервые была проверена корректность предположения о равновесности заряда пылевых частиц для вычисления траекторий и распределений концентрации пыли в гелиосфере и ее окрестностях.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе показано, что при анализе распределения межзвездной пыли внутри гелиосферы необходимо учитывать прохождение пылинок через гелиосферный ударный слой, поскольку эта область существенно влияет на распределение пыли в окрестности Солнца. Соответственно, разработанная кинетическая модель, в которой одновременно учитываются эффекты гелиосферного ударного слоя и нестационарность гелиосферного магнитного поля, является уникальным инструментом, с помощью которого можно проводить корректный анализ экспериментальных данных. В частности, с помощью данной модели можно будет провести анализ данных КА Ulysses и впервые оценить концентрацию и распределение по размерам пылевых частиц в ЛМС.

Помимо этого, с использованием разработанной модели можно осуществлять планирование научной программы измерения пылевых частиц в рамках миссий по изучению дальней гелиосферы. Результаты, полученные с помощью разработанной модели, представляют большую ценность при определении наиболее подходящих сценариев измерения пыли на КА Interstellar Express (CNSA; запуск запланирован на 2025-2026 гг.), а также при определении траектории КА Interstellar Probe (NASA; запуск запланирован на середину-конец 2030-х годов). Обнаруженные в диссертационной работе особенности распределения пыли, возникающие на каустиках, представляют большую значимость для разработки и научного обоснования будущих миссий по исследованию межзвездной пыли в окрестности Солнца.

Важный практический результат также заключается в том, что впервые была продемонстрирована чувствительность распределения межзвездной пыли в окрестности Солнца к изменению параметров невозмущенной ЛМС. Данный результат открывает новый способ для удаленной диагностики этих параметров, поэтому анализ имеющихся и будущих экспериментальных данных по межзвездной пыли позволит обеспечить независимую оценку этих параметров.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту

- 1) Показано, что при прохождении через границы гелиосферы частицы межзвездной пыли отклоняются от первоначального направления под действием межзвездного и гелиосферного магнитных полей. Продemonстрировано, что изменение скорости пылинок в ударном слое достигает 10 % от величины скорости частиц в невозмущенной ЛМС и приводит к существенным изменениям в распределении пыли в окрестности Солнца. В частности, получено, что гелиосферный ударный слой способствует проникновению частиц пыли радиусом 200-300 нм в определенные области на малые гелиоцентрические расстояния. Данный эффект был получен и объяснен впервые. Ранее всегда полагалось (по интуитивным соображениям), что гелиосферный ударный слой препятствует проникновению пыли, выступая своеобразным фильтром для нее. Также продемонстрировано, что влияние гелиосферного ударного слоя на более крупные пылинки (радиус ≥ 500 нм) минимально. Они проходят через границы гелиосферы практически беспрепятственно.
- 2) Доказано, что распределение межзвездной пыли в окрестности Солнца чувствительно к изменению параметров невозмущенной ЛМС, в частности, к изменению направления межзвездного магнитного поля. Данный результат открывает новый путь для удаленной диагностики физических процессов, происходящих на границе гелиосферы.
- 3) Показано, что под действием электромагнитной силы внутри гелиосферы в окрестности каустик – огибающих траекторий пылевых частиц – образуются области накопления пыли. При приближении к каустикам концентрация пыли стремится к бесконечности, однако возникающая особенность является интегрируемой. Положение и форма каустик зависят от того, насколько далеко от Солнца соответствующие пылинки проходят через минимумы солнечной активности, в течение которых происходит фокусировка или дефокусировка частиц по отношению к плоскости солнечного экватора.
- 4) Продemonстрировано, что учет хаотической скорости пыли в направлении, перпендикулярном плоскости солнечного экватора, приводит к тому, что сингулярности плотности пропадают. При этом добавление хаотической скорости в направлениях, параллельных плоскости солнечного экватора, практически не вносит никаких изменений в распределение пыли.
- 5) Получены оценки времени релаксации заряда пылевых частиц до равновесных значений при пересечении гелиопаузы. Показано, что для пылинок радиусом ≥ 100 нм релаксация происходит достаточно быстро (0,25 года и быстрее) и, соответственно, для вычисления траекторий частиц можно использовать приближение равновесного заряда. При этом заряд пылинок радиусом ≤ 10 нм не достигает равновесного значения внутри гелиосферы, поскольку данные частицы выносятся солнечным ветром обратно в ЛМС.

Степень достоверности результатов

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обоснована тем, что для моделирования использовались различные модели (кинетическая и жидкостная), которые при тестировании показывали одинаковые результаты. При использовании метода Монте-Карло в кинетическом подходе для контроля ошибки вычислялась относительная статистическая погрешность во всей области. Соответственно, количество траекторий, используемых для моделирования, выбиралось таким образом, чтобы величина погрешности не превышала 5 %. Для приближенного вычисления траекторий размер шага интегрирования выбирался так, чтобы при его уменьшении в 10 раз, отклонение траектории на выходе из расчетной области не превышало 5 %. Достоверность результатов также подтверждается тем, что теоретические концепции, на которых основаны вычисления, были ранее уже рассмотрены в рамках более простых моделей.

Тестирование модуля, ответственного за приближенное вычисление траекторий, проводилось с помощью сравнения результатов моделирования с известными аналитическими решениями для простейших случаев (движение в поле центрально-симметричных сил или в однородном магнитном поле). На отдельных примерах также проводилось сравнение с результатами, полученными в рамках известных в литературе моделей распределения пыли. При разработке всех численных моделей проводилась дополнительная отладка программ с целью выявления наиболее оптимальных параметров расчетных сеток, шагов интегрирования и количества моделируемых частиц.

Личное участие соискателя в получении результатов

Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично соискателем. Постановки задач, рассмотренных в диссертационной работе, принадлежат научному руководителю. Соискателем осуществлялись: разработка и тестирование всех численных программ, проведение расчетов, анализ полученных результатов, сравнение результатов с экспериментальными данными, подготовка и написание текстов публикаций, а также переписка 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.), семинарах лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН (рук. – д. ф.-м. н., проф. Баранов В. Б.), семинарах лаборатории межпланетной среды Института космических исследований РАН (рук. – д. ф.-м. н., проф. Измоленов В.В.), а также на международном семинаре по исследованию внешней гелиосферы OH/VLISM (рук. – к. ф.-м. н. Проворникова Е.А.). Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе на:

- международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2018 – 2024 гг.);
- конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2018 – 2024 гг.);
- конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2018 – 2024 гг.);
- конференции «Ломоносовские чтения» (МГУ, Москва, 2020 г., 2023 г., 2024 г.);
- 45-ой научной ассамблее COSPAR (г. Пусан, Южная Корея, 2024 г.);
- Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (СПбПУ, Санкт-Петербург, 2023 г.);
- школе-конференции «Исследование экзопланет: от Солнечной системы к экзопланетам» (САО РАН, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская р., 2021-2022 гг.);
- на Всероссийской конференции «Звездообразование и планетообразование» (АКЦ ФИАН, Москва, 2022 г., 2024 г.);
- 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (ИКИ РАН, Москва, 2022 г.);
- международной конференции Fourth Virtual Workshop on Numerical Modeling in MHD and Plasma Physics: Methods, Tools, and Outcomes (Новосибирск, 2021 г.);

Положения, выносимые на защиту, основаны на работах [1 – 6] из списка публикаций соискателя по теме диссертации, вклад соискателя в которые является основным. Всего соискателем опубликовано 8 статей в рецензируемых международных журналах из перечня

ВАК, включая 4 статьи в журналах первого и второго квартилей (Q1/Q2) международной базы Web of Science (WoS). Все публикации соответствуют теме диссертации.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

1. **Godenko E.A.**, Izmodenov V. V., «The unexpected role of heliospheric boundaries in facilitating interstellar dust penetration at 1-5 AU» // *Astronomy & Astrophysics*, 2024, 687, L4, doi: [10.1051/0004-6361/202450257](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450257)
2. **Годенко Е.А.**, Измоленов В.В., «Особенности распределения межзвездной пыли в гелиосфере с учетом нестационарного магнитного поля» // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2024, 59, 154-166, doi: [10.31857/S1024708424030112](https://doi.org/10.31857/S1024708424030112)
3. **Godenko E.A.**, Izmodenov V. V., «Dynamical charging of interstellar dust particles in the heliosphere» // *Advances in Space Research*, 2023, 72, 5142-5158, doi: [10.1016/j.asr.2023.09.016](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.016)
4. **Годенко Е.А.**, Измоленов В.В., «Сравнение эйлера и лагранжева подходов для нахождения особенностей распределения межзвездной пыли в гелиосфере в рамках модели холодного газа» // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*, 2024, 58, 138-150, doi: [10.31857/S0568528122600783](https://doi.org/10.31857/S0568528122600783)
5. **Годенко Е.А.**, Измоленов В.В., «Влияние дисперсии скоростей пыли в межзвездной среде на ее распределение внутри гелиосферы» // *Письма в Астрономический журнал*, 2021, 47, 1-13, doi: [10.31857/S0320010821010046](https://doi.org/10.31857/S0320010821010046)
6. **Mishchenko A.V.**, **Godenko E.A.**, Izmodenov V. V., «Lagrangian fluid approach for the modeling of peculiarities of the interstellar dust distribution in the astrospheres/heliosphere» // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 491, 2808-2821, doi: [10.1093/mnras/stz3193](https://doi.org/10.1093/mnras/stz3193)
7. **Sterken V.J.**, **Baalman L.R.**, **Draine B.T.**, **Godenko E.A.**, **Herbst K.**, **Hsu H.-W.**, **Hunziker S.**, **Izmodenov V.V.**, **Lallement R.**, **Slavin J.D.**, «Dust in and Around the Heliosphere and Astrospheres» // *Space Science Reviews*, 2022, 218, 71, doi: [10.1007/s11214-022-00939-7](https://doi.org/10.1007/s11214-022-00939-7)
8. **Godenko E.A.**, Izmodenov V. V., «Modelling of the interstellar dust distribution under the influence of the interstellar magnetic field» // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2028, 012014, doi: [10.1088/1742-6596/2028/1/012014](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2028/1/012014)

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.3.1 – Физика космоса, астрономия»: «Изучение происхождения, структуры, движения и эволюции космических объектов на базе физических теорий, астрономических наблюдений и физических измерений» и «Физика Солнца и солнечной активности. Гелиосфера. Солнечный ветер».

Соответствие содержания диссертации паспорту специальности «1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы»

Задачи, рассмотренные в диссертации, относятся к следующим разделам паспорта специальности «1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы»: «Динамика разреженных газов и молекулярная газодинамика» и «Течения многофазных сред (газожидкостные потоки, пузырьковые среды, газовзвеси, аэрозоли, суспензии и эмульсии)».

Вывод

Диссертация Годенко Егора Алексеевича 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 межзвездных пылевых частиц в гелиосфере» Годенко Егора Алексеевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 1.3.1 «Физика космоса, астрономия» и 1.1.9 «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 9 человек: зав. кафедрой проф. К. В. Краснобаев, уч. секретарь доц. С. И. Арафайлов, профессора В. В. Измоленов, В. Д. Котелкин, Ф. А. Максимов, А. Н. Осипцов, доценты А. Н. Белоглазкин, Г. Ю. Котова, ст.н.с. Л. В. Муравлева. Результаты голосования: «за» – 9; «против» – нет; воздержавшихся – нет. Протокол № 1 от 27.11.2024.

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



Краснобаев Константин Васильевич