

На правах рукописи



ГОДЕНКО Егор Алексеевич

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕЖЗВЁЗДНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ
В ГЕЛИОСФЕРЕ**

Специальность:

1.3.1 — Физика космоса, астрономия

Специальность:

1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2025

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

Научный руководитель: **Измоленов Владислав Валерьевич**
доктор физико-математических наук, профессор механико-математического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты: **Вибе Дмитрий Зигфридович**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий отделом физики и эволюции звёзд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт астрономии РАН (ИНАСАН)

Крайнев Михаил Борисович
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН (ФИАН)

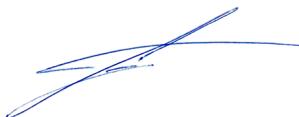
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН)

Защита диссертации состоится **23 мая 2025 г. в 11 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета 24.1.481.01 при ИКИ РАН по адресу: Москва, Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд А2 (конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2025/godenko.htm>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 117997, Москва, Профсоюзная, 84/32, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.481.01.
Автореферат разослан « 14 » апреля 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.1.481.01
кандидат физико-математических наук



А. Ю. Ткаченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Солнце движется относительно окружающей его локальной межзвёздной среды (ЛМС) со скоростью $\sim 26,4$ км/с [1]. В системе координат, связанной с Солнцем, поток ЛМС движется по направлению к покоящемуся Солнцу, причём скорость потока является сверхзвуковой (число Маха ~ 2). Плазменная компонента ЛМС вступает во взаимодействие с солнечным ветром — потоком, состоящим преимущественно из протонов, электронов и альфа-частиц, который, начиная с расстояний в несколько солнечных радиусов, также является сверхзвуковым. В результате взаимодействия двух сверхзвуковых потоков образуется структура из двух ударных волн (гелиосферной и головной) и тангенциального разрыва между ними (гелиопаузы), которая называется гелиосферным ударным слоем [2]. На ударных волнах сверхзвуковые потоки плазмы тормозятся до дозвуковых скоростей, а тангенциальный разрыв отделяет область распространения солнечного ветра (гелиосферу) от ЛМС. На рисунке 1 представлена качественная картина описанного течения. На течение в целом и, в частности, на положение поверхностей разрыва значительное влияние оказывает нейтральная компонента межзвёздной среды, которая взаимодействует с плазмой посредством перезарядки атомов водорода и протонов [3].

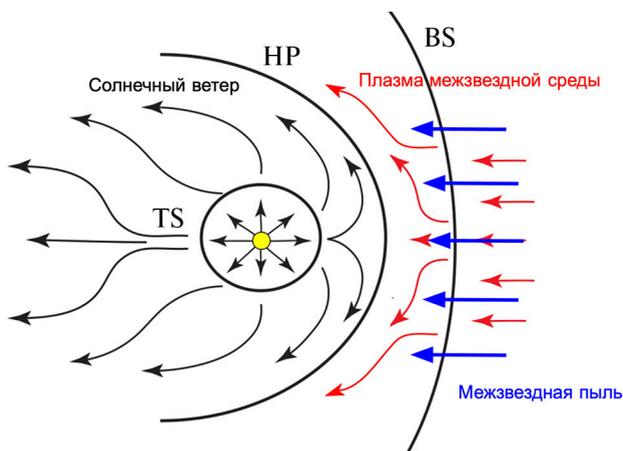


Рисунок 1 — Качественная картина взаимодействия солнечного ветра и ЛМС. Поверхности разрыва: TS (*англ.* Termination Shock) — гелиосферная ударная волна, HP (*англ.* Heliopause) — гелиопауза, BS (*англ.* Bow Shock) — головная ударная волна

Помимо плазменной и атомарной компонент, в ЛМС присутствует также пылевая компонента, частицы которой могут проникать в гелиосферу. Межзвёздные пылинки представляют собой твёрдые тела достаточно произвольной формы. Суммарная масса пылевых частиц в межзвёздной среде составляет приблизительно 1 % от массы межзвёздного газа [4]. Размеры пылинок находятся в достаточно широком диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрон [5, 6]. Из-за прилипания частиц окружающей плазмы на поверхность пылинки, фотоэмиссии и вторичной электронной эмиссии частицы пыли приобретают ненулевой электрический заряд (см., например, [7]), что делает их траектории чувствительными к гелиосферному и межзвёздному магнитным полям. Из анализа межзвёздного поглощения известно, что в межзвёздной среде присутствуют в основном кремниевые и углеродные частицы (см., например, [8, 9]). При этом в Солнечной системе на настоящий момент были обнаружены лишь кремниевые частицы по данным космического аппарата (КА) Cassini [10]. Отсутствие углеродных частиц предположительно вызвано существенной величиной силы радиационного давления солнечных фотонов, которая не позволяет этим пылинкам проникать на малые гелиоцентрические расстояния (см., например, [11, 12]).

Прямые измерения межзвёздной пыли были осуществлены в рамках нескольких миссий (КА Ulysses, Galileo, Cassini, Helios, Stardust), но наиболее значимые с научной точки зрения экспериментальные данные были получены на КА Ulysses [13]. Это стало возможным благодаря тому, что орбита КА Ulysses выходила за пределы плоскости эклиптики, и, следовательно, процесс определения того, что измеренная пылинка имеет именно межзвёздное происхождение (а не межпланетное), был существенно проще, чем в рамках других миссий. В работе [14] на основе полученных данных были вычислены потоки межзвёздной пыли вдоль траектории КА Ulysses и показано, что их величина существенно меняется в течение миссии. Это свидетельствует о неоднородности распределения межзвёздных пылевых частиц в гелиосфере. Причина возникающих неоднородностей заключается в совокупном влиянии на траектории пылинок трёх основных сил: гравитационного притяжения к Солнцу, радиационного давления солнечных фотонов и электромагнитной силы. Для исследования упомянутых неоднородностей необходимо проводить анализ на основе численного моделирования распределения межзвёздных пылевых частиц в гелиосфере, чему и посвящена настоящая диссертационная работа.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является исследование особенностей распределения межзвёздных пылевых частиц в гелиосфере и на её границе.

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

1. Изучены особенности распределения межзвёздной 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) 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 межзвёздных пылевых частиц при их движении внутри гелиосферы и в области гелиосферного ударного слоя. Для этого была разработана модель для вычисления заряда пылинок и проведены расчёты для частиц пыли различных размеров. С помощью дополнительных вычислений определены границы применимости предположения о равновесности заряда пылинок в гелиосфере.
 3. Изучено влияние гелиосферного ударного слоя на распределение межзвёздной пыли. Для этого была разработана кинетическая модель распределения пыли, в которой одновременно учитывается прохождение частиц через границы гелиосферы и нестационарность гелиосферного магнитного поля. С помощью построенной модели для частиц различных размеров проведены вычисления для двух случаев: с учётом и без учёта 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.

Актуальность диссертационной работы обеспечивается необходимостью корректного (на основе адекватных численных моделей) анализа имеющихся прямых измерений межзвёздной пыли (КА *Ulysses*, *Cassini*, *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 *IMAP* (*англ.* *Interstellar Mapping and Acceleration Probe*), на борту которого будет установлен прибор по измерению пыли *IDEX* (*англ.* *Interstellar Dust Experiment*), обладающий 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 межзвёздном пространстве, таких как: 1) перенос вещества в межзвёздной 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 межзвёздной пыли в окрестности Солнца может служить новым способом удалённой

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 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 звёзд представляется на данный момент одним из наиболее перспективных способов исследования свойств соответствующих звёздных ветров.

Научная новизна:

1. Впервые обнаружены области накопления межзвёздной пыли, возникающие в окрестности каустик — огибающих траекторий пылевых частиц. С помощью модели холодного газа показано, что концентрация пыли стремится к бесконечности при приближении к каустикам. В рамках кинетического подхода исследовано влияние дисперсии скорости пылевых частиц на формирование данных областей.
2. Впервые установлено, что распределение пыли в окрестности Солнца чувствительно к изменению параметров невозмущённой ЛМС, в частности, к изменению направления межзвёздного магнитного поля.
3. Впервые 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.
4. Впервые проведены оценки времени релаксации электрического заряда пыли при прохождении частиц через границы гелиосферы. Также впервые проверена корректность предположения о равновесности заряда пылевых частиц для вычисления траекторий и распределения концентрации пыли в гелиосфере и её окрестностях.

Теоретическая и практическая значимость работы:

В работе показано, что при анализе распределения межзвёздной 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, *англ.* China National Space Administration, Китайское национальное космическое управление; запуск запланирован на 2025–2026 гг.), а также при определении траектории КА Interstellar Probe (NASA, *англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США; запуск запланирован на середину – конец 2030-х гг.). Обнаруженные в диссертационной работе особенности распределения пыли, возникающие на каустиках, представляют большую значимость для разработки и научного обоснования будущих миссий по исследованию межзвёздной пыли в окрестности Солнца.

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

Методология и методы исследования:

В диссертационной работе для моделирования распределения пыли рассматриваются две модели: 1) кинетическая модель, 2) модель холодного газа. Кинетическая модель основана на решении кинетического уравнения для функции распределения. Для решения кинетического уравнения используется метод Монте-Карло. Модель холодного газа основана на решении уравнения неразрывности в лагранжевых переменных. Для решения этого уравнения применяется полный лагранжев метод, или, как его ещё называют в литературе, лагранжев метод Осипцова [15, 16]. Для одних задач, рассматриваемых в диссертационной работе, более целесообразно применять кинетическую модель (например, для исследования влияния границ гелиосферы на распределение пыли), а для других, напротив, более эффективным оказывается использование модели холодного газа (например, для поиска и исследования особенностей распределения пыли).

Для моделирования условий окружающей плазмы в третьей и четвёртой главах диссертации используется распределение, полученное из модели глобальной структуры гелиосферы, представленной в работах [17–19]. Для вычисления формы гелиосферного токового слоя применяется кинематический подход, основанный на предположении о том, что гелиосферное магнитное поле заморожено в солнечный ветер.

В третьей главе для вычисления заряда пылинок используется приближение равновесного заряда, границы применимости которого подробно обсуждаются в этой же главе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что межзвёздное и гелиосферное магнитные поля в области гелиосферного ударного слоя приводят к существенным изменениям в распределении межзвёздной пыли в окрестности Солнца.
2. Доказано, что распределение межзвёздной пыли в окрестности Солнца чувствительно к изменению параметров невозмущённой ЛМС, в частности, к изменению направления межзвёздного магнитного поля.
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.
4. Продемонстрировано, что учёт хаотической скорости пыли в направлении, перпендикулярном плоскости солнечного экватора, приводит к тому, что сингулярности плотности пропадают.
5. Обосновано использование приближения локально равновесного заряда для частиц межзвёздной пыли радиусом ≥ 100 нм в гелиосфере.

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обоснована тем, что для моделирования использовались различные модели (кинетическая и холодного газа), 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, число траекторий, используемых для моделирования, выбиралось таким образом, чтобы величина погрешности не превышала 5 %. Для приближённого вычисления траекторий размер шага интегрирования выбирался так, чтобы при его уменьшении в 10 раз, отклонение траектории на выходе из расчётной 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 приближённое 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 из работ [20–22]. При разработке всех численных моделей проводилась дополнительная отладка программ с целью выявления наиболее

оптимальных параметров расчётных сеток, шагов интегрирования и количества моделируемых частиц.

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-р физ.-мат. наук, проф. Краснобаев К. В.), семинарах лаборатории физической газовой динамики Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского РАН (рук. — д-р физ.-мат. наук, проф. Баранов В. Б.), семинарах лаборатории межпланетной среды Института космических исследований РАН (рук. — д-р физ.-мат. наук, проф. Измоленов В. В.), а также на международном семинаре по исследованию внешней гелиосферы OH-VLISM Online Seminar Series (*англ.* Outer Heliosphere Very Local Interstellar Medium) (рук. — канд. физ.-мат. наук Проворникова Е. А.). Основные положения и результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях, в том числе:

- Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов» (МГУ, Москва, 2018–2024 гг.);
- Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (ИКИ РАН, Москва, 2018–2024 гг.);
- Конференции «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, Москва, 2018–2025 гг.);
- Конференция «Ломоносовские чтения» (МГУ, Москва, 2020, 2023, 2024 гг.);
- 45-й Научная ассамблея COSPAR (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, пос. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесия, 2021–2022 гг.);
- Всероссийской конференции «Звездообразование и планетообразование» (АКЦ ФИАН, Москва, 2022, 2024 гг.);
- 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.);
- Конференции международных математических центров мирового уровня (Сочи, 2021 г.);
- Конференции Interstellar Probe Study Exploration Workshop (United States, 2020 г.);
- Конференции GRDI “Helio-plasmas” Workshop (Cargese, France, 2018 г.).

Публикации и личный вклад автора:

Положения, выносимые на защиту, основаны на работах [A1–A7] из списка публикаций автора по теме диссертации, вклад автора в которые является основным. Всего соискателем опубликовано 9 статей в рецензируемых 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.

Все результаты, выносимые на защиту, были получены лично автором диссертации. Постановки задач, рассмотренных в диссертационной работе, принадлежат научному руководителю. Автором осуществлялись: разработка и тестирование всех численных программ, проведение расчётов, анализ полученных результатов, сравнение результатов с экспериментальными данными, подготовка и написание текстов публикаций, а также переписка с редакциями журналов и рецензентами.

Структура и объём диссертации

Общий объём диссертации, состоящей из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений, составляет 172 страницы. В работе содержится 59 иллюстраций. Список используемой литературы состоит из 81 библиографической ссылки.

Содержание работы

Во **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.

Глава 1 диссертации посвящена теоретическим аспектам моделирования распределения межзвёздных пылевых частиц в гелиосфере. Материалы, представленные в данной главе, далее используются в главах 2–4 как теоретическая основа для проводимых вычислений.

В **разделе 1.1** представлено введение к главе 1, которое содержит подробный исторический обзор работ по моделированию распределения межзвёздной пыли в гелиосфере, а также условную классификацию современных моделей.

В **разделе 1.2** рассмотрена динамика частиц пыли в гелиосфере, которая определяется тремя основными силами: гравитационным притяжением к Солнцу, радиационным давлением солнечных фотонов и электромагнитной силой. В **подразделе 1.2.1** обсуждается влияние центрально-симметричных сил гравитации и радиационного давления. Для этого вводится специальный безразмерный параметр β , который равен отношению двух упомянутых сил, и рассматриваются траектории пылинок для случаев $\beta > 1$ и $\beta < 1$. После этого в **подразделе 1.2.2** выписывается в общем виде выражение для электромагнитной силы и формулируется уравнение движения:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = (\beta - 1) \frac{GM_S}{r^2} \mathbf{e}_r + \frac{Q}{c_0 m_d} [(\mathbf{v} - \mathbf{v}_p) \times \mathbf{B}],$$

где G — гравитационная постоянная; M_S — масса Солнца; r — расстояние от Солнца до пылинки; \mathbf{e}_r — единичный вектор, направленный вдоль радиус-вектора пылинки (отсчитывается от Солнца); m_d — масса пылинки; Q — заряд частицы; c_0 — скорость света в вакууме; \mathbf{v} — скорость пылинки; \mathbf{v}_p — скорость плазмы в данной точке; \mathbf{B} — вектор индукции магнитного поля. Данное уравнение используется для моделирования траекторий в главах 3 и 4, а в главе 2 для наглядности применяется упрощённое уравнение, вывод которого представлен в **подразделе 1.2.3**. Этот вывод основан на использовании аналитических выражений для скорости плазмы (сферически-симметричный солнечный ветер) и гелиосферного магнитного поля (паркеровская спираль):

$$\mathbf{v}_p = v_{sw} \mathbf{e}_r, \quad \mathbf{B} = p \left(B_E \left(\frac{r_E}{r} \right)^2 \mathbf{e}_r - B_E \frac{\Omega_S r_E}{v_{sw}} \left(\frac{r_E}{r} \right) \sin \vartheta \mathbf{e}_\varphi \right),$$

где v_{sw} — скорость солнечного ветра; p — полярность гелиосферного магнитного поля; B_E — индукция магнитного поля на орбите Земли; r_E — среднее расстояние от Солнца до Земли; Ω_S — частота вращения Солнца вокруг своей оси; ϑ — угол между осью вращения Солнца и радиус-вектором пылинки; \mathbf{e}_φ — единичный вектор, направленный перпендикулярно плоскости, образованной осью вращения Солнца и радиус-вектором пылинки. Проводится обезразмеривание с использованием скорости движения невозмущённой ЛМС относительно Солнца v_{LISM} и характерного расстояния $L_* = GM_S / v_{LISM}^2$ и вводятся дополнительные безразмерные параметры:

$$\varepsilon = \frac{3UB_E r_E^2 \Omega_S}{4\pi c_0 \rho a^2 v_{LISM}^2}, \quad \nu = \frac{v_{sw}}{\Omega_S L_*}, \quad \kappa = \frac{v_{LISM}}{v_{sw}},$$

где U — поверхностный потенциал для сферической частицы, $U = Q/a$; a — радиус пылинки; ρ — массовая плотность вещества, из которого состоят пылинки. После некоторых оценок ($\nu \approx 1$, $\kappa \ll 1$) выписывается упрощённое уравнение движения пылинок в безразмерном виде:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = (\beta - 1) \frac{\mathbf{e}_r}{r^2} - p\varepsilon \frac{\sin \vartheta}{r} \mathbf{e}_\varphi,$$

где \mathbf{e}_φ — единичный вектор, лежащий в плоскости, образованной осью вращения Солнца и радиус-вектором пылинки, и направленный перпендикулярно вектору \mathbf{e}_r .

Солнечное магнитное поле представляет собой диполь, поэтому полярность гелиосферного магнитного поля меняется при пересечении особой поверхности — гелиосферного токового слоя. Из-за вращения Солнца токовый слой имеет волнообразную форму, которая напоминает юбку балерины (см., например, [23]). В **подразделе 1.2.4** описан кинематический подход для определения формы токового слоя, который используется в диссертационной работе. Этот подход основан на предположении, что гелиосферное магнитное поле вморожено в плазму, т.е. его полярность сохраняется

в лагранжевой частице солнечного ветра. При этом в окрестности Солнца (на расстоянии трёх солнечных радиусов) токовый слой предполагается плоским, а положение этой плоскости определяется углом поворота Солнца вокруг своей оси и фазой 22-летнего цикла солнечной активности.

Раздел 1.3 посвящён обсуждению теоретических подходов для описания распределения межзвёздной пыли в гелиосфере. В диссертационной работе рассматриваются две модели: кинетическая модель и модель холодного газа. В **подразделе 1.3.1** описан кинетический подход, который основан на решении кинетического уравнения для функции распределения пыли:

$$\begin{cases} \frac{\partial f^d}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f^d}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F} \cdot \frac{\partial f^d}{\partial \mathbf{v}} = 0, \\ f^d \Big|_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_{\text{LISM}}} = f_{\text{LISM}}^d(\mathbf{v}), \\ f^d \Big|_{\mathbf{v} \rightarrow \infty} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где f^d — функция распределения пыли; \mathbf{F} — поле результирующей силы; f_{LISM}^d — функция распределения пыли в невозмущённой ЛМС; \mathbf{r}_{LISM} — поверхность, на которой ставится граничное условие. Отметим, что система (1) справедлива для частиц фиксированного размера. В реальности в межзвёздной среде существуют пылинки разных размеров, которые, согласно астрономическим наблюдениям, удовлетворяют определённому распределению по размерам [5, 6], однако в диссертационной работе частицы каждого фиксированного размера рассматриваются по отдельности. За исключением раздела 2.4, в работе используется предположение о том, что скорость всех частиц на границе одинакова и равна скорости невозмущённой ЛМС относительно Солнца. Во всех случаях в качестве границы рассматривается плоскость, перпендикулярная направлению вектора скорости пыли в невозмущённой ЛМС, которая находится на заданном расстоянии от Солнца: в главе 2 — на расстоянии 100 а. е., в главе 3 — на расстоянии 1000 а. е., в главе 4 — на расстоянии 75 и 1000 а. е. В **подразделе 1.3.2** описываются детали метода Монте-Карло, который используется для решения кинетического уравнения. В частности, вводятся случайные величины, которые соответствуют искомым физическим величинам, определяется алгоритм, по которому происходит вычисление реализаций этих случайных величин. Также обсуждаются преимущества и недостатки кинетической модели применительно к данной задаче.

В **подразделе 1.3.3** представлено описание модели холодного газа, в рамках которой используется лагранжев подход, основанный на решении уравнения неразрывности в лагранжевых переменных:

$$n^d(t, \mathbf{r}_0) \left| \det \left(J_{ij}(t, \mathbf{r}_0) \right) \right| = n^d(0, \mathbf{r}_0),$$

где n^d — концентрация пыли; \mathbf{r}_0 — лагранжевы координаты частицы; J_{ij} — компоненты матрицы перехода от лагранжевых переменных к эйлеровым (матрицы Якоби). Данное уравнение справедливо вдоль траектории пылинки. Соответственно, для того чтобы вычислить концентрацию пыли

в произвольной точке, нужно найти частицу, траектория которой проходит через эту точку, и вычислить компоненты матрицы Якоби (и якобиан). Для определения компонент матрицы Якоби используется полный лагранжев метод, или, как его ещё часто называют в литературе, лагранжев метод Осипцова [15, 16]. Описание этого метода представлено в **подразделе 1.3.4**. В нём формулируется замкнутая система обыкновенных дифференциальных уравнений для определения компонент матрицы Якоби, а также обсуждаются преимущества и недостатки модели холодного газа, по сравнению с кинетической моделью.

В **разделе 1.4** диссертационной работы приводится заключение к главе 1.

В **главе 2** диссертации исследуется влияние эффектов, возникающих внутри гелиосферной ударной волны, на распределение частиц межзвёздной пыли.

В **разделе 2.1** представлено введение к главе 2, в котором описана упрощённая стационарная фокусирующая конфигурация гелиосферного магнитного поля. Данная конфигурация далее для наглядности используется при моделировании в разделах 2.2–2.5.

В **разделе 2.2** представлены траектории пылевых частиц, а также распределение концентрации, полученное с помощью кинетической модели, для пылинок разных размеров. Показано, что под действием электромагнитной силы в окрестности плоскости солнечного экватора формируются каустики — огибающие, которые, по определению, каждым своим конечным сегментом касаются бесконечного числа траекторий пылинок. Результаты моделирования показывают, что в ячейках, содержащих каустики, концентрация пыли существенно возрастает. Для более подробного исследования каустик в **разделе 2.3** проводится моделирование с помощью модели холодного газа.

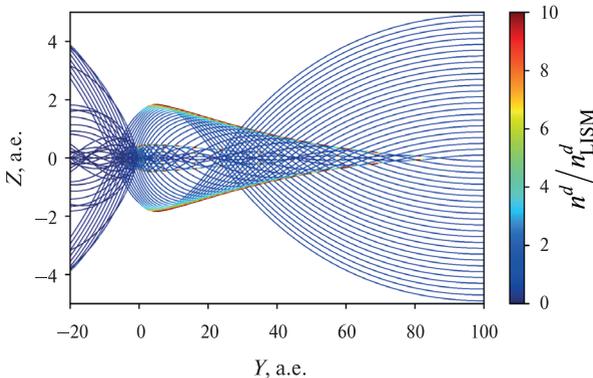


Рисунок 2 — Траектории и концентрация частиц (показана цветом), вычисленная вдоль траекторий с помощью лагранжева метода Осипцова. Радиус пылинок $a = 300$ нм. Параметр $\beta = 1$, т.е. силы гравитации и радиационного давления взаимно компенсируют друг друга

На рисунке 2 продемонстрированы траектории пылинок размером $a = 300$ нм и концентрация этих частиц, вычисленная вдоль траекторий с помощью лагранжева метода Осипцова. Результаты вычислений показывают, что при пересечении каустики определитель матрицы перехода от лагранжевых переменных к эйлеровым (якобиан) становится равным нулю, в результате чего концентрация пыли стремится к бесконечности. Дополнительные вычисления показывают, что данная особенность является интегрируемой. Причина возникновения особенностей на каустиках заключается в том, что под действием электромагнитной силы в стационарном случае поток пылевых частиц после пересечения токового слоя начинает сужаться, что, согласно закону сохранения массы, приводит к увеличению концентрации.

Для существования каустик важно, что все частицы пыли на границе расчётной области имеют одинаковую скорость, поэтому в **разделе 2.4** исследуется влияние хаотической скорости пыли на формирование особенностей распределения концентрации. Для этой цели в рамках кинетического подхода в граничное условие вводится дисперсия скорости и, соответственно, для каждой частицы случайным образом, согласно заданному граничному распределению, выбираются не только начальные координаты, но и компоненты начальной скорости. На рисунке 3 показано распределение концентрации пыли в случае, когда хаотическая скорость вводится в направлении, перпендикулярном плоскости солнечного экватора.

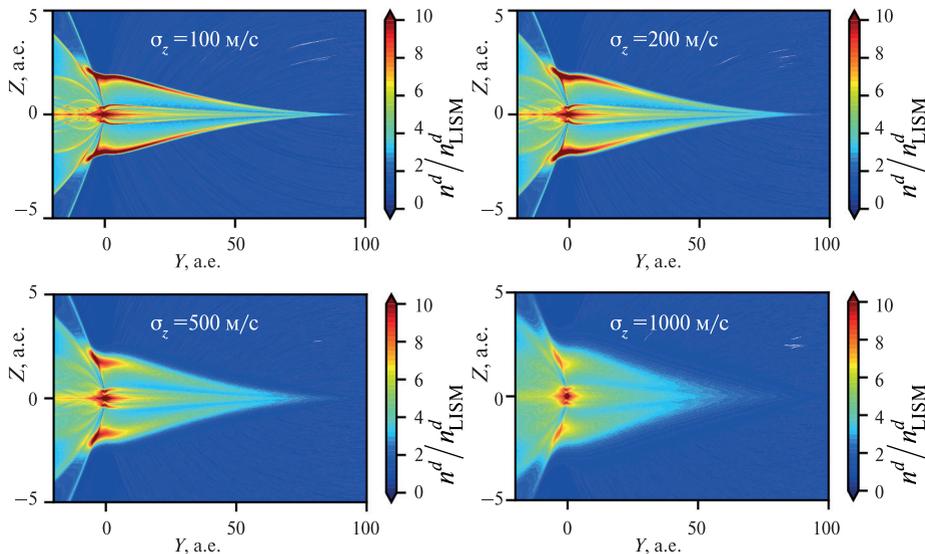


Рисунок 3 — Распределение концентрации пылинок размером $a = 300$ нм и $\beta = 1$ при разной дисперсии скорости в направлении, перпендикулярном плоскости солнечного экватора ($z = 0$)

Результаты моделирования показывают, что при наличии относительно небольшой дисперсии ($<5\%$ от скорости пыли в невозмущённой ЛМС) каустики пропадают. При увеличении дисперсии несингулярная область повышенной концентрации становится более однородной, а её ширина увеличивается. При этом дополнительные вычисления показывают, что при добавлении хаотической скорости в направлении, параллельном плоскости солнечного экватора, изменений в распределении концентрации пыли практически не происходит. В **разделе 2.5** диссертации исследуется влияние центрально-симметричных сил радиационного давления и гравитации на распределение пыли. Показано, что данные силы практически не оказывают никакого влияния на каустики. При этом в окрестности Солнца при $\beta > 1$ возникают дополнительные особенности, связанные с тем, что под действием силы радиационного давления пылинки замедляются и отклоняются от своего первоначального направления так, что сечение соответствующей трубки тока становится практически параллельным вектору скорости пыли, в результате чего происходит увеличение концентрации.

Представленные в разделах 2.2–2.5 результаты соответствуют упрощённому случаю, когда предполагается, что гелиосферное магнитное поле является стационарным. В реальности, как было упомянуто ранее, поверхность разрыва полярности гелиосферного магнитного поля меняется в течение 22-летнего цикла солнечной активности, поэтому в **разделе 2.6** рассматривается влияние указанной нестационарности на особенности распределения пылевых частиц. В этой части диссертации продемонстрировано, что распределение концентрации пыли существенно меняется по сравнению со случаем стационарного фокусирующего токового слоя. Показано, что в нестационарном случае каустики, подобные тем, что были получены ранее, формируются только в определённые моменты времени, а именно для тех пылинок, которые проходят через фокусирующий солнечный минимум на расстоянии 10–20 а.е. от Солнца. При этом в другие моменты времени в окрестности Солнца могут формироваться каустики другого типа, которые возникают из-за дефокусировки пылевых частиц. С помощью модели холодного газа показано, что концентрация пыли при приближении к каустикам в случае нестационарного магнитного поля также стремится к бесконечности.

В **разделе 2.7** диссертационной работы приводится заключение к главе 2.

Результаты, представленные в главе 2, получены в предположении, что заряд пылинок является постоянным, хотя в реальности его величина зависит от условий окружающей плазмы, которые значительно меняются вдоль траекторий движения частиц. Соответственно, **глава 3** диссертации посвящена исследованию изменения электрического заряда межзвёздных пылевых частиц при их движении в гелиосфере и в области гелиосферного ударного слоя.

В **разделе 3.1** представлено введение к главе 3, которое включает в себя краткий исторический обзор работ по исследованию электрического заряда пылевых частиц в гелиосфере.

В разделе 3.2 описаны основные процессы, которые влияют на формирование электрического заряда пылинок в гелиосферных условиях: 1) прилипание частиц окружающей плазмы к пылинке, 2) вторичная электронная эмиссия, 3) фотоэлектронная эмиссия. Далее поочерёдно рассматривается каждый из указанных процессов. **Подраздел 3.2.1** посвящён прилипанию частиц плазмы к пылинке. Вводится понятие коэффициента прилипания, а величина соответствующего тока записывается как произведение этого коэффициента на количество столкновений между частицами окружающей плазмы и рассматриваемой пылинкой (в единицу времени), которое выражается с помощью трёхмерного интеграла. В **подразделе 3.2.2** вводится понятие коэффициента вторичной электронной эмиссии — количества вторичных электронов, возникающих при каждом столкновении с первичной частицей окружающей плазмы. Аналогично тому, как это было сделано в случае прилипания, в данном случае ток, соответствующий вторичным электронам, также вычисляется через количество столкновений пылинки с первичными частицами окружающей плазмы. В **подразделе 3.2.3** вводится понятие коэффициента фотоэлектронной эмиссии — количества образовавшихся фотоэлектронов на каждый поглощённый фотон, причём в данной работе учитываются первичные и вторичные фотоэлектроны с внешних и внутренних энергетических уровней, а также оже-электроны [24]. Чтобы вычислить соответствующий ток, выписывается одномерный интеграл по спектру излучения, в котором учтены два источника, побуждающие фотоэлектронную эмиссию — солнечные и межзвёздные фоновые фотоны.

Раздел 3.3 посвящён подходам, которые используются для моделирования заряда пылинок. Выписывается уравнение для динамического изменения заряда вдоль траектории, а также вводится понятие равновесного заряда. Под динамическим зарядом понимается заряд, вычисленный с помощью отдельного дифференциального уравнения на заряд, которое решается вдоль траектории частицы одновременно с уравнениями движения пылинки. Равновесный заряд — заряд, при котором алгебраическая сумма токов, протекающих через пылинку, равна нулю.

В **разделе 3.4** представлены результаты моделирования заряда пылинок. Все результаты в данной главе были получены с использованием распределений плазмы из модели глобальной структуры гелиосферы [17–19]. В **подразделе 3.4.1** представлены результаты моделирования равновесного заряда. Показано, что равновесный поверхностный потенциал пылинок (величина, пропорциональная отношению заряда частицы к радиусу) существенно увеличивается под действием вторичной электронной эмиссии во внутреннем ударном слое при переходе из ЛМС в гелиосферу (от 1–2 до 10–20 В). Также в работе продемонстрировано, что равновесный потенциал увеличивается с уменьшением размера частиц.

Существенное изменение равновесного потенциала частиц при пересечении гелиопаузы приводит к необходимости проверки предположения о равновесности заряда в данной области, поэтому в **подразделе 3.4.2** исследуется релаксация заряда при переходе из ЛМС в гелиосферу.

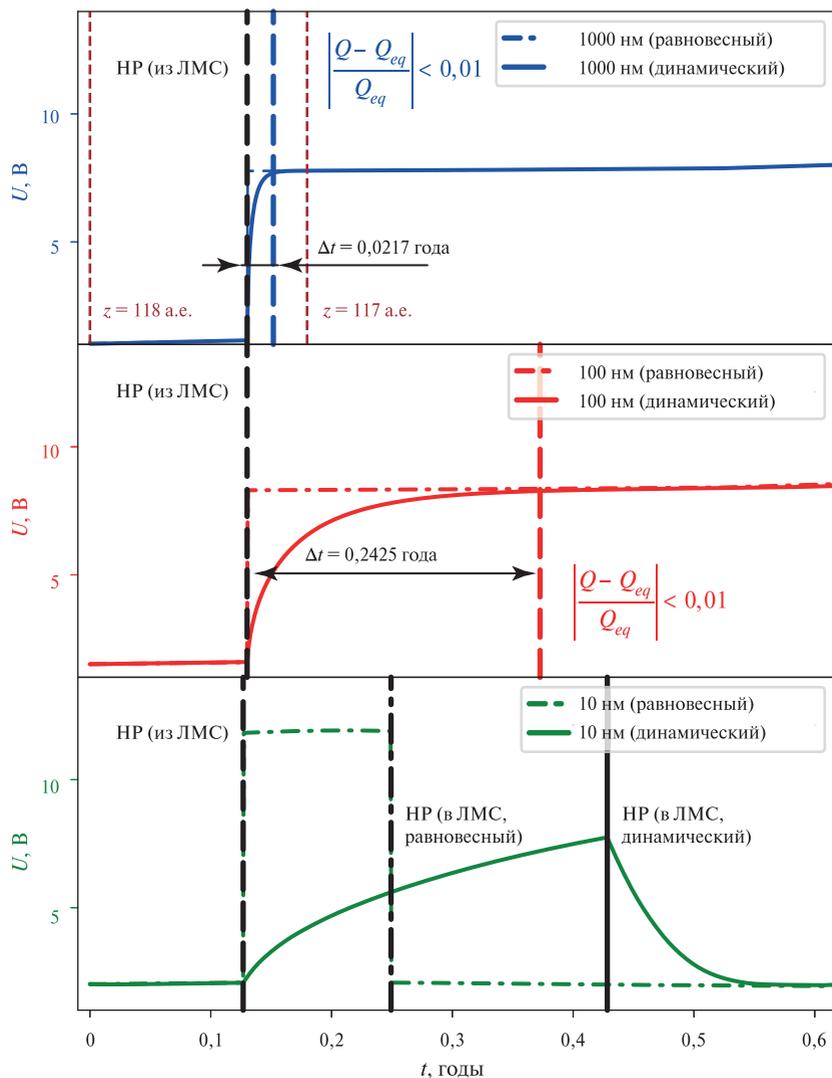


Рисунок 4 — Изменение поверхностного потенциала при пересечении гелиопаузы для пылинок разных размеров. Вертикальные штриховые линии чёрного цвета соответствуют пересечению пылинкой гелиопаузы из ЛМС в гелиосферу, остальные линии чёрного цвета — пересечению, наоборот, из гелиосферы в ЛМС. Цветные вертикальные пунктирные линии показывают момент установления равновесного заряда

На рисунке 4 продемонстрировано, как для частиц пыли различных размеров динамически меняется поверхностный потенциал в окрестно-

сти гелиопаузы, а также представлены значения равновесного потенциала в соответствующих точках. Результаты моделирования показывают, что для крупных пылинок ($a = 1000$ нм) релаксация заряда до равновесных значений происходит достаточно быстро ($\sim 0,02$ года), по сравнению со временем, которое межзвёздная пылинка затрачивает на прохождение расстояния в 1 а.е. ($\sim 0,2$ года). Средним пылинкам ($a = 100$ нм), чтобы достичь равновесия, нужно пройти расстояние приблизительно в 1–2 а.е. Мелкие пылинки ($a = 10$ нм) не достигают равновесия вовсе, поскольку выносятся солнечным ветром обратно в ЛМС. Таким образом, можно сделать вывод, что для крупных пылинок стандартное приближение равновесного заряда является достаточно точным. Дополнительные вычисления показывают, что использование приближения равновесного заряда не оказывает практически никакого эффекта на распределение концентрации пылинок средних размеров. При этом для мелких частиц наблюдается существенное влияние, которое выражается в изменении формы и размера области повышенной концентрации пыли в окрестности гелиопаузы. Следовательно, для пылинок средних размеров приближение равновесного заряда работает всё ещё достаточно хорошо, в то время как в случае мелких частиц для вычислений следует рассматривать более точный подход с использованием динамически меняющегося заряда.

В разделе 3.5 диссертационной работы приводится заключение к главе 3.

Глава 4 посвящена исследованию влияния гелиосферного ударного слоя на распределение пыли. Для этой цели была разработана кинетическая модель распределения межзвёздной пыли в гелиосфере, в которой одновременно учитываются эффекты гелиосферного ударного слоя и нестационарность гелиосферного магнитного поля.

В разделе 4.1 представлено введение к главе 4, которое содержит краткий обзор работ по исследованию влияния границ гелиосферы на траектории и распределение межзвёздной пыли.

Описание кинетической модели, используемой для моделирования в главе 4, представлено в разделе 4.2. В подразделе 4.2.1 обсуждается распределение параметров плазмы, полученное из модели глобальной структуры гелиосферы [17–19], отдельное внимание уделяется форме гелиосферного токового слоя. В подразделе 4.2.2 представлены технические детали используемого для вычислений метода Монте-Карло. Для исследования влияния гелиосферного ударного слоя рассматриваются два случая: в одном случае граничное условие ставится в невозмущённой ЛМС на расстоянии 1000 а.е. от Солнца (модель 1), а в другом — около гелиосферной ударной волны на расстоянии 75 а.е. (модель 2).

В разделе 4.3 представлены результаты моделирования. На рисунке 5 продемонстрировано распределение концентрации частиц пыли размером $a = 250$ нм в глобальной гелиосфере в различные моменты времени. Из представленных результатов видно, что распределение пыли является существенно неоднородным и нестационарным, что вызвано, прежде всего, взаимодействием частиц с гелиосферным магнитным полем в области

сверхзвукового солнечного ветра. Так, с 1986 по 1997 г. из-за фокусирующего эффекта магнитного поля происходит притяжение частиц к плоскости солнечного экватора, в результате чего формируются области накопления пыли в окрестности Солнца. Далее (с 1997 по 2008 г.) после переполюсовки гелиосферного магнитного поля наступает дефокусирующая фаза солнечного цикла, и частицы начинают двигаться в направлении от экваториальной плоскости. Соответственно, образовавшиеся во время фокусировки области накопления пыли начинают удаляться в разные стороны от плоскости солнечного экватора и далее сносятся вниз по потоку в хвостовую часть гелиосферы.

Изменения в распределении пыли возникают не только внутри гелиосферной ударной волны, но и при прохождении частиц через гелиосферный ударный слой. Из рисунка 5 видно, что пылинки испытывают небольшое отклонение вдоль оси y (оси, перпендикулярной BV -плоскости), которое вносит дополнительную асимметрию в распределение. В подразделе 4.3.1 подробно исследуется прохождение пылинок через гелиосферный ударный слой. На рисунке 6 показана траектория одной частицы от начала движения до пересечения с гелиосферной ударной волной. При прохождении через внешний ударный слой частица приобретает дополнительную скорость вдоль оси y , которая составляет 5% от величины v_{LISM} , т.е. происходит отклонение пылинки от первоначального направления.

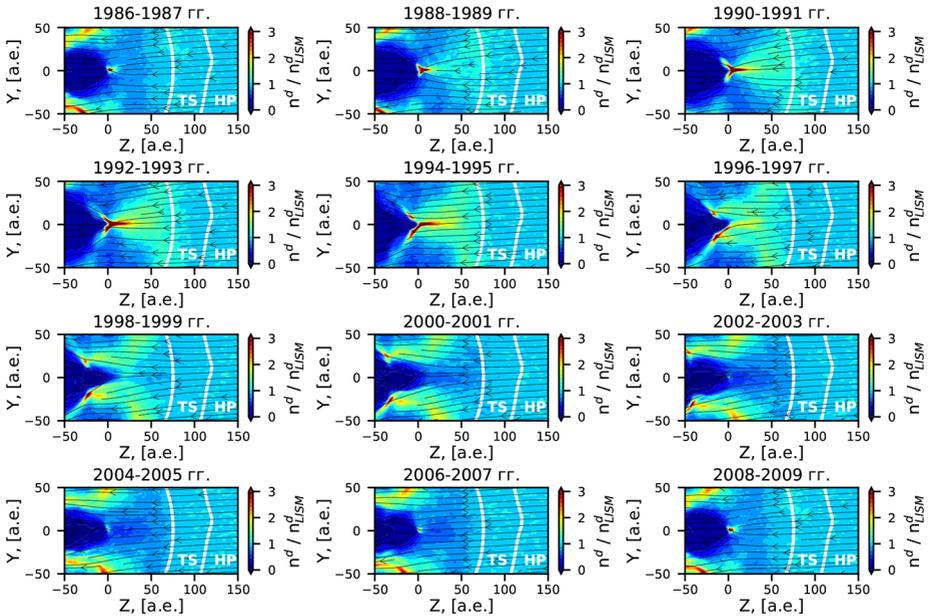


Рисунок 5 — Распределение концентрации частиц пыли размером $a = 250$ нм ($\beta = 1,264$) в глобальной гелиосфере в различные моменты времени. Стрелки чёрного цвета соответствуют линиям тока

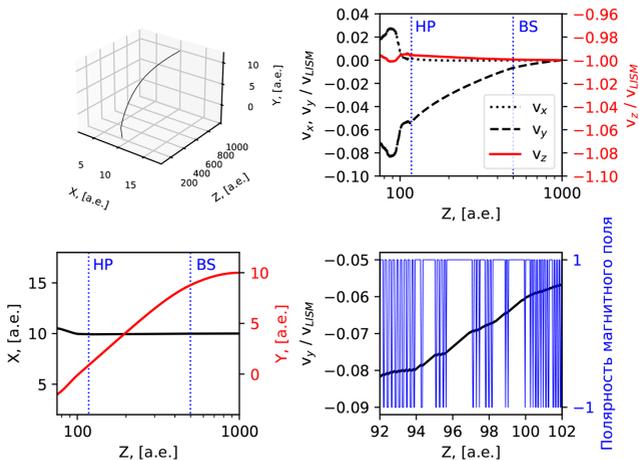


Рисунок 6 — Траектория и компоненты скорости частицы размером $a = 250$ нм от начала движения до пересечения с гелиосферной ударной волной. Справа снизу в увеличенном масштабе показана зависимость компоненты скорости v_y и полярности гелиосферного магнитного поля вдоль траектории от координаты z во внутреннем ударном слое

Это отклонение возникает из-за замедления плазмы и увеличения индукции магнитного поля при приближении к гелиопаузе. Во внутреннем ударном слое частица начинает взаимодействовать с гелиосферным магнитным полем. При этом существенное изменение скорости возникает только в моменты прохождения достаточно протяжённых участков с постоянной полярностью магнитного поля — аналогичный эффект рассматривался в главе 2 для области сверхзвукового солнечного ветра. В диссертационной работе показано, что суммарное изменение скорости пыли во внешнем и внутреннем ударном слое может достигать 10 % от величины v_{LISM} .

Подраздел 4.3.2 посвящён исследованию влияния гелиосферного ударного слоя на распределение пыли в окрестности Солнца. На рисунке 7 представлено распределение концентрации частиц пыли размером $a = 250$ нм в плоскости $z = 0$, полученное с помощью модели 1.

Из рисунка видно, что из-за взаимодействия частиц с гелиосферным магнитным полем в определённые моменты времени вдоль плоскости солнечного экватора формируются области повышенной концентрации пыли. На рисунке 8 продемонстрирована разница между распределениями в плоскости $z = 0$, полученными с помощью моделей 1 и 2.

Из рисунка видно, что форма и размеры области повышенной концентрации в окрестности плоскости солнечного экватора зависят от используемой модели. Существенные различия возникают преимущественно в первой половине солнечного цикла (до ~1998 г.). В частности, в 1994–1998 гг. область накопления пыли для модели 1 находится ближе к плоскости солнечного экватора, чем для модели 2.

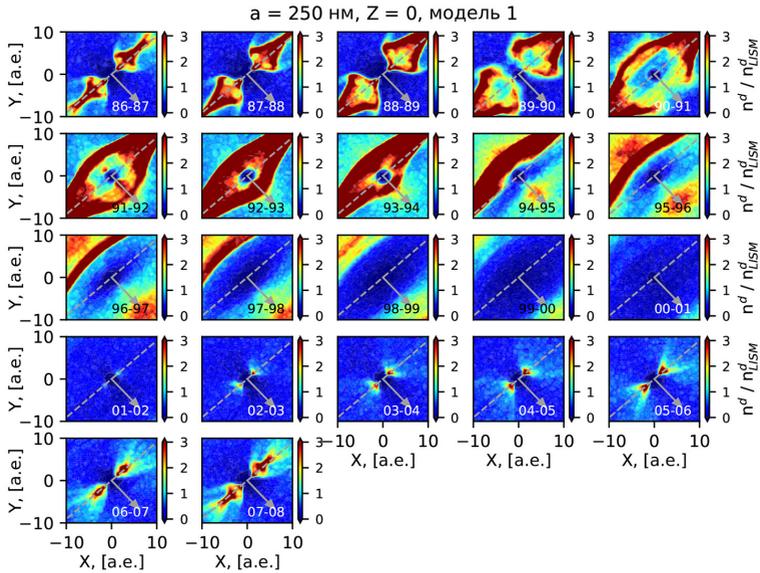


Рисунок 7 — Распределение концентрации частиц пыли размером $a = 250 \text{ нм}$ в плоскости $z = 0$ в различные моменты времени. Штриховая линия соответствует положению плоскости солнечного экватора, стрелкой показана ось вращения Солнца (направление на север)

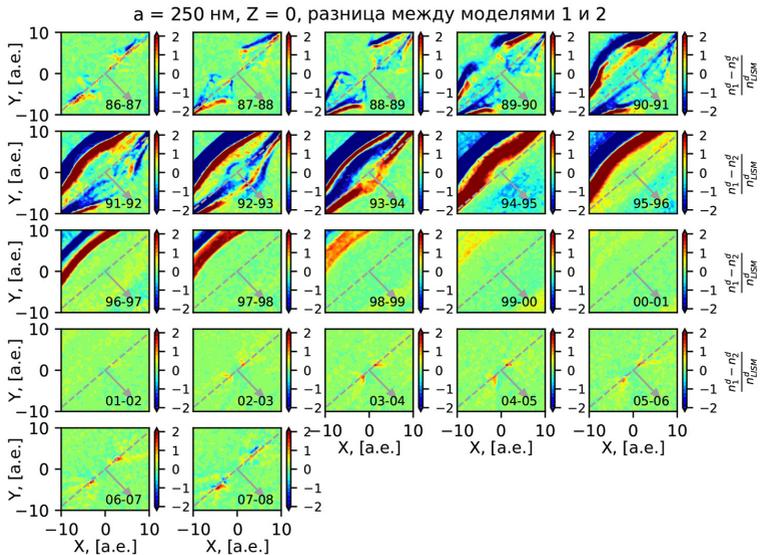


Рисунок 8 — Разность между соответствующими результатами, полученными с помощью моделей 1 и 2

Это означает, что прохождение частиц через гелиосферный ударный слой способствует проникновению пыли в определённые области на малые гелиоцентрические расстояния. Полученный результат является неожиданным, поскольку в более ранних работах [21, 25] было показано, что частицы данных размеров испытывают лишь фильтрацию на границе гелиосферы. Основная причина разницы с предыдущими моделями заключается в том, что в модели, представленной в диссертационной работе, учтена нестационарность гелиосферного магнитного поля.

В подразделе 4.3.3 изучается чувствительность распределения пыли в окрестности Солнца к изменению направления межзвёздного магнитного поля. Для этого рассматриваются два распределения параметров окружающей плазмы, которые отличаются друг от друга величиной угла (α_{BV}) между векторами скорости плазмы и индукции магнитного поля ($\alpha_{BV} = 120^\circ$ и $\alpha_{BV} = 140^\circ$). На рисунке 9 продемонстрировано отклонение скорости частицы вдоль оси, перпендикулярной BV-плоскости, для двух указанных случаев.

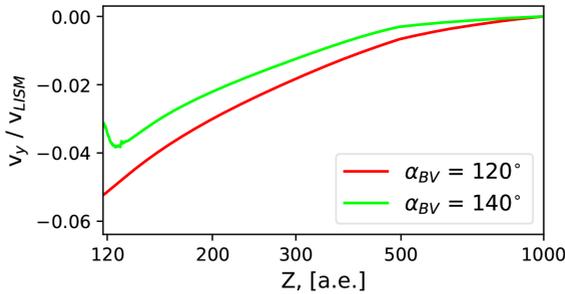


Рисунок 9 — Отклонение скорости частицы пыли размером $a = 250$ нм во внешнем ударном слое при разных значениях параметра α_{BV} : 120° (красный цвет) и 140° (зелёный цвет). Левая граница соответствует прохождению частицы через границу гелиосферы в случае $\alpha_{BV} = 120^\circ$

При $\alpha_{BV} = 120^\circ$ отклонение больше, поскольку в этом случае бóльшую величину имеет компонента магнитного поля B_x , которая и определяет степень отклонения частиц во внешнем ударном слое (см. подраздел 4.3.1 диссертационной работы). На рисунке 10 продемонстрирована разность между распределением частиц пыли размером $a = 250$ нм в плоскости $z = 0$, полученными при $\alpha_{BV} = 120^\circ$ и $\alpha_{BV} = 140^\circ$. Из рисунка видно, что существенные различия между распределением появляются в промежутке примерно с 1991 по 1998 г. Формирующаяся около плоскости солнечного экватора область накопления пыли смещается вдоль оси вращения Солнца при изменении параметра α_{BV} . В результате возникают протяжённые вдоль солнечного экватора области, где значение концентрации отличается в несколько раз для двух случаев. Соответственно, измерения межзвёздной пыли в данных областях позволили бы с помощью разработанной модели оценить направление магнитного поля в межзвёздной среде.

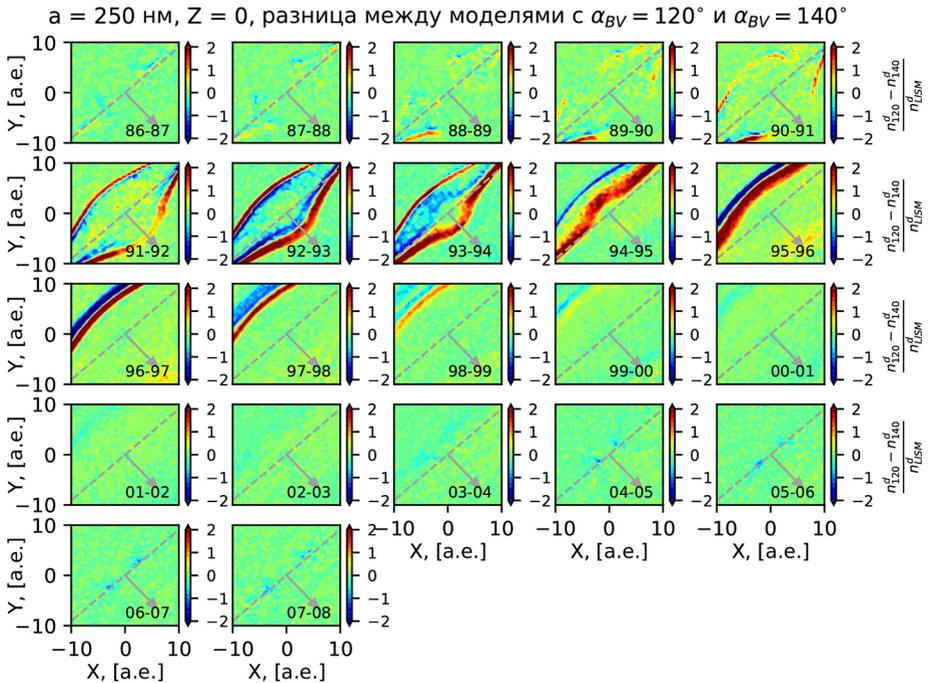


Рисунок 10 — Разность между соответствующими результатами, полученными с помощью моделей с $\alpha_{BV} = 120^\circ$ и $\alpha_{BV} = 140^\circ$

В **разделе 4.4** диссертационной работы приводится заключение к главе 4.

Завершающий диссертационную работу раздел **Заключение** содержит основные результаты и выводы проделанной работы.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. *Mishchenko A., Godenko E., Izmodenov V.* Lagrangian fluid approach for the modeling of peculiarities of the interstellar dust distribution in the astrospheres/heliosphere // *MNRAS*. 2020. V. 491. P. 2808–2821. DOI: 10.1093/mnras/stz3193.
- A2. *Годенко Е., Измоленов В.* Влияние дисперсии скоростей пыли в межзвездной среде на ее распределение внутри гелиосферы // *Письма в Астрон. журн.* 2021. Т. 47. С. 1–13. DOI: 10.31857/S0320010821010046.
- A3. *Годенко Е., Измоленов В.* Сравнение эйлерова и лагранжева подходов для нахождения особенностей распределения межзвездной пыли в гелиосфере // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*. 2023. Т. 58. С. 138–150. DOI: 10.31857/S0568528122600783.
- A4. *Godenko E., Izmodenov V.* Dynamical charging of interstellar dust particles in the heliosphere // *Advances in Space Research*. 2023. V. 72. P. 5142–5158. DOI: 10.1016/j.asr.2023.09.016.

- A5. *Годенко Е., Измоленов В.* Особенности распределения межзвездной пыли в гелиосфере с учетом нестационарного магнитного поля // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2024. Т. 59. С. 154–166. DOI: 10.31857/S1024708424030112.
- A6. *Godenko E., Izmodenov V.* The unexpected role of heliospheric boundaries in facilitating interstellar dust penetration at 1–5 AU // *Astronomy and Astrophysics*. 2024. V. 687. Article L4. 9 p. DOI: 10.1051/0004-6361/202450257.
- A7. *Godenko E., Izmodenov V.* Caustics of interstellar dust particles in the heliosphere // *Fluid Dynamics*. 2024. V. 59. P. 2412–2425. DOI: 10.1134/S0015462824605047.
- A8. *Godenko E., Izmodenov V.* Modelling of the interstellar dust distribution under the influence of the interstellar magnetic field // *J. Physics: Conference Series*. 2021. V. 2028. Article 012014. 13 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2028/1/012014.
- A9. *Sterken V.J., Baalman L.R., Draine B.T., Godenko E., Herbst K., Hsu H.-W., Hunziker S., Izmodenov V., Lallement R., Slavin J.D.* Dust in and Around the Heliosphere and Astrospheres // *Space Science Reviews*. 2022. V. 218. No. 8. Article 71. DOI: 10.1007/s11214-022-00939-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Witte M.* Kinetic parameters of interstellar neutral helium. Review of results obtained during one solar cycle with the Ulysses/GAS-instrument // *Astronomy and Astrophysics*. 2004. V. 426. P. 835–844. DOI: 10.1051/0004-6361:20035956.
2. *Баранов В. Б., Краснобаев К. В., Куликовский А. Г.* Модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой // Докл. Акад. наук. 1970. Т. 194. С. 41–44.
3. *Baranov V.B., Malama Y.G.* Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium numerical solution of self-consistent problem // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. Iss. A9. P. 15157–15164. DOI: 10.1029/93JA01171.
4. *Frisch P.C., Dorschner J.M., Geiss J. et al.* Dust in the Local Interstellar Wind // *The Astrophysical J*. 1999. V. 525. No 1. P. 492–516. DOI: 10.1086/307869.
5. *Weingartner J.C., Draine B.T.* Dust Grain-Size Distributions and Extinction in the Milky Way, Large Magellanic Cloud, and Small Magellanic Cloud // *The Astrophysical J*. 2001. V. 548. No. 1. P. 296–309. DOI: 10.1086/318651.
6. *Wang S., Li A., Jiang B.W.* Very Large Interstellar Grains as Evidenced by the Mid-infrared Extinction // *The Astrophysical J*. 2015. V. 811. No. 1. P. 38. DOI: 10.1088/0004-637X/811/1/38.
7. *Kimura H., Mann I.* The Electric Charging of Interstellar Dust in the Solar System and Consequences for Its Dynamics // *Astrophysical J*. 1998. May. V. 499. No. 1. P. 454–462. DOI: 10.1086/305613.
8. *Draine B.T.* Interstellar Dust Grains // *Annu. Review of Astronomy and Astrophysics*. 2003. V. 41. P. 241–289. DOI: 10.1146/annurev.astro.41.011802.094840.
9. *Tielens A.G.G.M.* Interstellar polycyclic aromatic hydrocarbon molecules // *Annu. Review of Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 46. P. 289–337. DOI: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145211.
10. *Atobelli N., Postberg F., Fiege K. et al.* Flux and composition of interstellar dust at Saturn from Cassini’s Cosmic Dust Analyzer // *Science*. 2016. V. 352. No. 6283. P. 312–318. DOI: 10.1126/science.aac6397.
11. *Kimura H., Mann I.* Radiation pressure on porous micrometeoroids // *Meteoroids 1998* / eds. W.J. Baggaley, V. Porubcan. 1999. P. 283–386.
12. *Kimura H., Okamoto H., Mukai T.* Radiation Pressure and the Poynting-Robertson Effect for Fluffy Dust Particles // *Icarus*. 2002. V. 157. No. 2. P. 349–361. DOI: 10.1006/icar.2002.6849.

13. *Grün E., Zook H.A., Baguhl M. et al.* Discovery of Jovian dust streams and interstellar grains by the Ulysses spacecraft // *Nature*. 1993. V. 362. No. 6419. P. 428–430. DOI: 10.1038/362428a0.
14. *Strub P., Krüger H., Sterken V.J.* Sixteen Years of Ulysses Interstellar Dust Measurements in the Solar System. II. Fluctuations in the Dust Flow from the Data // *The Astrophysical J.* 2015. V. 812. No. 2. Article 140. DOI: 10.1088/0004-637X/812/2/140.
15. *Osiptsov A. N.* Lagrangian Modelling of Dust Admixture in Gas Flows // *Astrophysics and Space Science*. 2000. V. 274. P. 377–386. DOI: 10.1023/A:1026557603451.
16. *Osiptsov A. N.* Development of the Full Lagrangian Approach for Modeling Dilute Dispersed Media Flows (a Review) // *Fluid Dynamics*. 2024. V. 59. No. 1. P. 1–48. DOI: 10.1134/S0015462823602425.
17. *Izmodenov V.V., Alexashov D. B.* Three-dimensional Kinetic-MHD Model of the Global Heliosphere with the Heliopause-surface Fitting // *The Astrophysical J. Supplement Series*. 2015. V. 220. No. 2. Article 32. 14 p. DOI: 10.1088/0067-0049/220/2/32.
18. *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 and Astrophysics*. 2020. V. 633. Article L12. 7 p. DOI: 10.1051/0004-6361/201937058.
19. *Izmodenov V.V., Alexashov D. B.* The strong effect of electron thermal conduction on the global structure of the heliosphere // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2023. May. V. 521. No. 3. P. 4085–4090. DOI: 10.1093/mnras/stad741.
20. *Sterken V.J., Altobelli N., Kempf S. et al.* The flow of interstellar dust into the solar system // *Astronomy and Astrophysics*. 2012. V. 538. Article A102. 24 p. DOI: 10.1051/0004-6361/201117119.
21. *Slavin J. D., Frisch P. C., Müller H.-R. et al.* Trajectories and Distribution of Interstellar Dust Grains in the Heliosphere // *The Astrophysical J.* 2012. V. 760. No. 1. Article 46. 15 p. DOI: 10.1088/0004-637X/760/1/46.
22. *Alexashov D. B., Katushkina O. A., Izmodenov V.V., Akaev P.S.* Interstellar dust distribution outside the heliopause: deflection at the heliospheric interface // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Soc.* 2016. V. 458. No. 3. P. 2553–2564. DOI: 10.1093/mnras/stw514.
23. *Smith E.J.* The heliospheric current sheet // *J. Geophysical Research*. 2001. V. 106. Iss. A8. P. 15819–15831. DOI:10.1029/2000JA000120.
24. *Weingartner J. C., Draine B. T., Barr D.K.* Photoelectric Emission from Dust Grains Exposed to Extreme Ultraviolet and X-Ray Radiation // *Astrophysical J.* 2006. V. 645. No. 2. P. 1188–1197. DOI: 10.1086/504420.
25. *Linde T.J., Gombosi T.I.* Interstellar dust filtration at the heliospheric interface // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. Iss. A5. P. 10411–10418. DOI: 10.1029/1999JA900149.

Годенко Егор Алексеевич
Особенности распределения межзвёздных пылевых частиц в гелиосфере

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать _____.2025. Заказ № ____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.
Издательство ИКИ РАН. Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32