

Утверждаю:

И.О. директора Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
космических исследований РАН,



д.ф.-м.н. чл-корр. РАН

А.А. Петрукович

"*Петрукович*" 2023 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации - Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института космических исследований Российской академии наук

на диссертацию Дивина Андрея Викторовича

"Кинетическое и МГД моделирование процессов в бесстолкновительной гелиосферной
плазме", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.1 - Физика космоса, астрономия

В диссертационной работе А. В. Дивина посредством математического численного моделирования развивается целый ряд новых моделей магнитосферных и гелиосферных процессов. Трехмерное моделирование методом "Частица-в-ячейке" является мощным численным методом, который позволяет получить результаты на передовом крае науки. Благодаря постоянному получению новых данных в наиболее активных областях магнитосферы Земли возможно изучение процессов на кинетических и масштабах в околоземной плазме.

Общая характеристика работы.

Для исследования солнечной системы, а также для планируемых пилотируемых полетов на Луну необходимо создание точных моделей плазменного окружения нашего спутника, а также фундаментальное исследование взаимодействия плазмы с поверхностью и магнитными аномалиями. А. В. Дивин развивает новое в России направление научных исследований, а именно: численное моделирование кинетических процессов в плазме с помощью суперкомпьютерных методов исследования. Вычисления проводились с использованием крупнейших суперкомпьютерных мощностей, как российских, так и зарубежных. С помощью единого вычислительного программного продукта диссертантом разработан ряд новых моделей бесстолкновительного магнитного пересоединения, а также

изучены кинетические процессы, сопровождающие взаимодействие солнечного ветра с различными телами в гелиосфере.

Диссертация представлена в виде короткого доклада (22 страницы текста на русском языке, 20 страниц текста на английском языке). В докладе сформулированы 6 основных результатов, выносимых на защиту; соответственно, доклад разбит на 6 блоков:

Часть 1. Численное моделирование магнитного пересоединения и модель электронной диффузионной области. Соискателем последовательно разрабатывается модель электронной диффузионной области в процессе бесстолкновительного пересоединения. Благодаря постоянному получению новых данных в наиболее активных областях магнитосферы Земли возможно изучение процессов на кинетических масштабах в околоземной плазме. Это, в свою очередь, обуславливает потребность во все более детальных моделях процесса для интерпретации спутниковых данных. В диссертации для окрестности нейтральной линии разработана модель электронной диссипации, которая основана на негиротропии электронного давления. Показана существенная зависимость скорости магнитного пересоединения и структуры электронной диффузионной области от внешних параметров, несмотря на существующую гипотезу, согласно которой эта скорость в бесстолкновительной плазме всегда порядка 0.1. Установлено, что внешняя и внутренняя электронные диффузионные области являются единым объектом. Смена знака электронной анизотропии вызвана ускорением электронов параллельно магнитному полю в области втекания.

Часть 2. Процессы в окрестности фронтов и сепаратрис магнитного пересоединения. В данной части исследована роль нижнегибридной волновой активности, проводится сравнение результатов вычислений со спутниковыми данными, а также рассмотрены аналитические дисперсионные соотношения. В численных работах соискателя особое внимание уделяется структуре и волновым процессам на фронте магнитного пересоединения. Показано, что характеристики фронтов, полученные в результате численного моделирования, весьма точно воспроизводят наблюдаемые спутниками фронты диполизации. С помощью трехмерного моделирования изучена устойчивость сепаратрис магнитного пересоединения. Электронные пучки на сепаратрисах неустойчивы по отношению к электронной моде Кельвина-Гельмгольца и к неустойчивости Бунемана. В асимметричном пересоединении на сепаратрисах развивается нижнегибридная активность, которая приводит к аномальному турбулентному переносу и дополнительному нагреву электронов.

Часть 3. Магнитное пересоединения в присутствии холодных ионов. В данной части рассматриваются различные аспекты магнитного пересоединения при наличии в плазме ионных популяций с существенно разной температурой. Впервые показано посредством численного моделирования, что присутствие холодных ионов не подавляет эффект Холла в плазме и не замедляет процесс. Наоборот, скорость магнитного пересоединения может быть выше вследствие развития анизотропии давления в области. В плазме формируется многомасштабная диффузионная область, при этом размер области размагничивания каждой из популяций (ионы, холодные ионы, электроны) различный.

Холодные ионы ускоряются Холловским электрическим полем на сепаратрисах, формируя функции распределения типа "эхо-полумесяцы" в области вытекания.

Часть 4. Модель взаимодействия солнечного ветра с лунными магнитными аномалиями. В работах соискателя и его соавторов изучается взаимодействие потока солнечного ветра с магнитными полями Луны, в ходе которого формируются так называемые мини-магнитосферы, то есть объекты с характерным размером порядка или меньше ионного гирорадиуса. Показано, что в окрестности сильных локальных магнитных полей возникают области, куда не проникает солнечный ветер. Новым здесь является применение полностью трехмерного кинетического подхода. В ходе улучшения модели была поставлена и успешно решена техническая задача добавления в вычислительный код эмпирического магнитного поля Луны. С помощью данной модели проведено самосогласованное трехмерное численное моделирование магнитной аномалии "Рейнер Гамма". Показано, что эмпирическая модель магнитного поля производит высыпания на поверхность, по своей форме напоминающие картину лунного вихря (космическое выветривание) на поверхности Луны.

Часть 5. Модель взаимодействия солнечного ветра с атмосферой слабой кометы. В данной части работы рассматривается численное моделирование взаимодействия солнечного ветра со слабой кометой с параметрами, близкими к свойствам кометы Чурюмова-Герасименко на расстоянии 3-4 астрономических единиц от Солнца. Комета в модели аппроксимируется добавлением ионов на каждом шаге по времени в соответствии с аналитической моделью и известной скоростью испарения кометного материала. Численное моделирование позволило отождествить формирование сверхтепловой популяции электронов (которая устойчиво наблюдается в данных спутника Rosetta) с амбиполярным ускорением [A31].

Часть 6. Численное МГД моделирование неустойчивости двойного градиента (флэппинг-неустойчивость). В данной части рассматривается крупномасштабная медленная неустойчивость, которая приводит к смещению всего токового слоя магнитосферы в "вертикальном" направлении. Включение возможности МГД моделирования в единый вычислительный продукт в диссертации обусловлено тем, что характерные масштабы данной задачи слишком ресурсозатратны для моделирования полностью кинетическим трехмерным методом. В модели учитывается ведущее магнитное поле и искривление хвоста магнитосферы. Показано, что именно данный фактор влияет на срыв магнитосферной суббури.

Научная новизна. В диссертационном докладе представлены результаты исследований кинетических процессов в гелиосфере, полученные соискателем. Поставленные соискателем задачи решены на хорошем уровне, при этом ряд созданных моделей носит по-настоящему новаторский характер и сделаны впервые. Полученные результаты неоднократно докладывались автором на российских и международных конференциях и опубликованы в 42 статьях в высокорейтинговых международных научных журналах.

Стоит отметить ряд недостатков диссертации, а также формы защиты в виде доклада в целом:

1. Хотя формат защиты диссертации в виде научного доклада не предполагает развернутого описания исследований, проведенных соискателем, в тексте диссертации крайне желательно было бы привести графики с основными полученными результатами. Принимая во внимание разноплановость численных моделирований, графики позволили бы наглядно продемонстрировать объем проделанной работы и защищаемые положения.

2. Крайне мало информации уделяется численному методу и техническому описанию проведенных вычислений, что требуется для оценки сложности проделанной работы.

3. В тексте диссертации не упоминается, каково начальное состояние плазмы в задаче о кинетическом магнитном пересоединении. В частности, при описании конфигурации токового слоя хвоста предполагается, что нормальная к слою V_z компонента магнитного поля равна нулю. В реальности, в токовом слое практически всегда присутствует ненулевое поле V_z , которое самосогласованно влияет на динамику частиц, и может приводить к формированию сложных многомасштабных токовых конфигураций. Данный факт, как правило, игнорируется при проведении численного моделирования магнитного пересоединения.

Несмотря на указанные недостатки, диссертация Дивина Андрея Викторовича на тему: «Кинетическое и МГД моделирование процессов в бесстолкновительной гелиосферной плазме» удовлетворяет основным требованиям, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 "О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете", соискатель Дивин Андрей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Отзыв составила Григоренко Елена Евгеньевна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), г. Москва, 117997, ул. Профсоюзная, д. 84/32.

Результаты диссертации заслушаны, отзыв утвержден на заседании НТС отдела Физики космической плазмы ИКИ РАН 21 ноября 2023 г. Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования: "за" - 10 чел, "против" - 0 чел., "воздержалось" - 0 чел.

Ведущий научный сотрудник ИКИ РАН
д. ф. – м. н.



Григоренко Е.Е.

Секретарь НТС
к.ф.-м.н.



Рахманова Л.С.