

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Мингалева Олега Викторовича на диссертацию Дивина Андрея Викторовича на тему «Кинетическое и МГД моделирование процессов в бесстолкновительной гелиосферной плазме», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Диссертация А.В. Дивина посвящена численному моделированию кинетических процессов в бесстолкновительной плазме магнитосферы Земли и околоземного солнечного ветра с помощью полунейвного параллельного кода iPIC3D на основе метода частиц. Магнитосфера Земли представляет собой сложную и крупномасштабную открытую систему, которая тесно взаимодействует как с ионосферой, так и с околоземным солнечным ветром, и образует вместе с ними плазменную оболочку Земли, в которой протекают взаимосогласованные сложные процессы в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Многие из этих процессов, в частности, глобальные возмущения — магнитосферные бури и суббури, оказывают большое воздействие на технологические системы и здоровье человека. Исследованию околоземного космического пространства традиционно уделяется большое внимание международного научного сообщества.

Имеющиеся и ожидаемые в перспективе экспериментальные данные для гелиосферы и магнитосферы заведомо недостаточно полны для того, чтобы по ним можно было с нужной детализацией восстановить общую картину многих протекающих в этих областях разномасштабных магнитоплазменных процессов. Поэтому численное моделирование является важным и незаменимым инструментом для изучения многих из указанных процессов и активно развивается в последние пять десятилетий по мере быстрого роста вычислительной производительности компьютеров и разработки необходимого программного обеспечения, а также алгоритмов и численных методов. Это подтверждается большим числом работ по этой тематике в международных научных журналах.

Большим и важным направлением исследований являются работы по численному моделированию кинетических процессов, использующие так называемые параллельные коды на основе метода частиц, которые представляют из себя комплексы программ для численного решения системы уравнений Власова-Максвелла с тяжелыми модельными электронами методом крупных частиц. Такие комплексы программ являются мощным, но вместе с тем сложным инструментом исследований, и используют массивно-параллельные вычисления на кластерных суперкомпьютерах, которые состоят из большого числа одинаковых серверных узлов, связанных между собой быстрой сетью. Выполнение моделирования с использованием параллельного кода является очень сложным видом научной работы и требует разнообразных знаний и навыков в нескольких различных областях. Поэтому тема диссертации является актуальной и находится на переднем крае современной науки.

Следует отметить, что А.В. Дивин входит в команду разработчиков кода iPIC3D, а также получил в результате моделирования с помощью этого кода содержательные физические результаты. Также следует отметить, что кроме А.В. Дивина очень малое число отечественных ученых освоили и используют параллельные коды для моделирования процессов в бесстолкновительной плазме.

Поэтому глубокое изучение и практическое освоение А.В. Дивиним такого относительно нового и очень сложного инструмента научных исследований, каким является параллельный код

iPIC3D, является очень важным для отечественной науки результатом его работы, который формально не включен в перечень выносимых на защиту результатов. С методической точки зрения А.В. Дивин существенно улучшил методику обработки результатов расчетов в коде iPIC3D.

Относительно физических результатов работы можно отметить следующее.

1. Для известной задачи о пересоединении токового слоя Харриса с входными параметрами, соответствующими плазме ближнего хвоста земной магнитосферы, с помощью кода iPIC3D получены три новых результата.
 - 1.1. В результате детального моделирования с высоким разрешением выявлены новые важные особенности электронной диффузионной области, что позволило существенно улучшить интерпретацию имеющихся данных измерений на космических аппаратах.
 - 1.2. Впервые создана модель с учетом популяции фоновых холодных ионов, расчеты по которой показали, что холодные ионы могут играть важную роль в процессе пересоединения, в частности, возможно их существенное ускорение. Результаты расчетов по этой модели также улучшили интерпретацию спутниковых измерений.
 - 1.3. В результате детального моделирования с высоким разрешением исследованы фронты пересоединения и получено возбуждение нижнегибридных волн, которые хорошо соответствуют данным измерений на спутниках миссии Cluster, в том числе объяснены тонкие детали наблюдаемых в данных измерений фронтов диполизации и показано, что они соответствуют фронтам пересоединения в численной модели.
2. С помощью параллельного кода iPIC3D создана численная модель магнитосферы слабой кометы 67P/Чурюмова-Герасименко на расстоянии 3-4 астрономических единиц от Солнца. Расчеты по этой модели продемонстрировали образование магнитосферы у кометы и выявили механизм ускорения сверхтепловых электронов амбиполярным электрическим полем, что позволило объяснить интенсивность наблюдаемых в атмосфере этой кометы спутником Rosetta потоков энергичных электронов.
3. С помощью кода iPIC3D создана численная модель минимагнитосферы над участком поверхности Луны в области магнитной аномалии РейнерГаммас с существенным локальным магнитным полем, которое задавалось по эмпирической модели магнитного поля Луны. Расчеты по этой модели продемонстрировали образование минимагнитосферы размером в несколько километров, в которую не проникает солнечный ветер в течение всех лунных суток, в том числе и при прохождении Луной магнитосферы Земли. Также расчеты выявили формирование плазменного вихря на поверхности Луны под действием космического выветривания и тонкую структуру в пространственном распределении потоков ионов солнечного ветра, падающих на поверхность Луны в окрестности магнитной аномалии, а также выявили хорошее соответствие этой структуры распределению цвета лунной поверхности в области магнитной аномалии. В результате моделирование дало объяснение различной окраске лунного грунта в области магнитных аномалий.
4. С помощью замены в коде iPIC3D блока переноса плазмы с кинетического на магнитогидродинамический была создана пространственно трехмерная численная модель магнитосферного хвоста. Расчеты по этой модели показали, что она сохраняет пространственно двумерное точное решение в виде токового слоя с изотропным давлением, который искривляется в зависимости от наклона оси геомагнитного диполя. Было выполнено

пространственно трехмерное моделирование линейной и нелинейной стадий неустойчивости двойного градиента (“флэппинг”-неустойчивости) хвоста магнитосферы Земли со стартом от указанного выше точного решения. Показано, что искривление токового слоя является критическим параметром магнитосферного хвоста, приводящим к срыву взрывного процесса магнитосферной суббури.

В качестве общей характеристики диссертационной работы следует отметить, что в ней на высоком уровне выполнено численное моделирование и сравнение его результатов с данными измерений на космических аппаратах, и в итоге получены важные физические результаты.

Диссертация Дивина Андрея Викторовича на тему «Кинетическое и МГД моделирование процессов в бесстолкновительной гелиосферной плазме» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а 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.

Член диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник, заведующий сектором
Полярного геофизического института
Дата

Мингалев О.В.
05 декабря 2023 г.

Подпись О.В. Мингалева заверяю.
Ученый секретарь ПГИ
Дата



Попова Т.А.
05 декабря 2023 г.