

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского
Государственного Университета,
профессор С. П. Туник

“18” марта 2014 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Васько Ивана Юрьевича

«Математические модели токовых слоев в магнитосферных хвостах планет», представленную на соискание

ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Кандидатская диссертация И. Ю. Васько посвящена математическому моделированию токовых слоев магнитосферных хвостов планет – плазменных структур, играющих одну из ключевых ролей в формировании и эволюции магнитосфер планет солнечной системы, экзопланет, комет, солнечной короны, а также, возможно, пульсаров и других астрофизических объектов. В диссертации описываются разработанные автором двумерные кинетические модели осесимметричных и плоских токовых слоев. Разработка моделей включает в себя построение полуаналитических решений системы уравнений Власова-Максвелла для соответствующих конфигураций на основе найденных автором автомодельных решений уравнения Грэда-Шафранова для векторного потенциала магнитного поля. Помимо этих результатов универсального характера, отдельное внимание уделено рассмотрению некоторых частных проблем физики магнитосферных хвостов. А именно: построена модель токового слоя магнитосферного хвоста Нептуна и рассмотрен процесс ускорения ионов за счет топологической перестройки магнитосферы в ходе суточного вращения планеты; построена самосогласованная магнитогидродинамическая модель наклонных токовых слоев, наблюдаемых в магнитосферном хвосте Земли, и предложена методика восстановления потенциала электрического поля поляризации; в рамках

магнитогидродинамического подхода рассмотрена продольная структура магнитосферного хвоста Венеры и оценена длина этого хвоста, а также на основании спутниковых измерений предложена модель поперечной структуры тонкого токового слоя хвоста.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 171 страницу. Список литературы включает 220 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели работы, дано краткое изложение структуры диссертации, обоснована научная новизна результатов, их достоверность, теоретическая и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту. Приведен краткий обзор основных экспериментальных данных о магнитосферах Земли, Юпитера, Нептуна и Венеры и структурах токовых слоев их магнитосферных хвостов, рассмотрены магнитогидродинамический и кинетический подходы к описанию плазменных равновесий.

В первой главе построены двумерные кинетические модели осесимметричных и плоских токовых слоев. Получено уравнение типа уравнения Грэда-Шафранова для магнитного потока (в первом случае) и магнитного потенциала (во втором случае) с правой частью, зависящей от конкретного вида функции распределения частиц плазмы. Методами группового анализа показано, что полученные уравнения допускают однопараметрические группы преобразований для двух специфических функций правой части, соответствующих максвелловской и степенной функциям распределения. Полученные однопараметрические группы преобразований используются для построения автомодельных (инвариантных) решений. В итоге во всех четырех случаях: осесимметричный или плоский токовый слой, максвелловская или степенная функция распределения – задача сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка для функции одной переменной. Аналитически найдены асимптотики этих уравнений и построены их численные решения. Получены также аналитические решения для одного частного случая степенного распределения (показатель степени $k = 7/2$). Показано, что параметром k определяется скорость убывания магнитного поля и плотности плазмы в нейтральной плоскости с ростом расстояния от планеты.

Во второй главе исследуется процесс ускорения заряженных частиц в магнитосферном хвосте Нептуна. Предложен механизм ускорения частиц, который может реализовываться в магнитосферах, схожих по структуре с магнитосферой Нептуна, характерной особенностью которого является сильный наклон магнитного диполя планеты по отношению к оси вращения и потоку солнечного ветра. Такая конфигурация приводит к тому, что положение магнитного диполя относительно потока солнечного ветра в ходе суточного вращения изменяется от почти перпендикулярного до почти сонаправленного и обратно. Это означает, что топологическая структура магнитосферы Нептуна циклически эволюционирует между конфигурацией земного типа (плоский токовый слой хвоста) и цилиндрически симметричной конфигурацией, что приводит к генерации индукционного электрического поля, особенно в северной доле хвоста магнитосферы, где изменения магнитного поля наиболее значительны. Предложена аналитическая модель циклически меняющегося магнитного поля, на основании которой оценена максимальная энергия, которая может быть набрана протоном в северной доле в ходе одной топологической перестройки (330 кэВ), и найдена пропорциональная зависимость средней по спектру энергии от времени перестройки. Аналитические оценки подтверждены результатами численного моделирования движения протонов солнечного ветра с энергиями 0.3 – 1 кэВ и ионосферных ионов азота с энергиями 10 – 30 эВ, инжектируемых в модельную магнитосферу Нептуна. Показано, что после семи циклов перестройки, когда все частицы покидают магнитосферу, финальный спектр обрывается на энергии около 330 кэВ для протонов и 150 кэВ для ионов азота, причем частицы покидают магнитосферу преимущественно через утренний фланг.

В третьей главе исследована структура наклонных токовых слоев в магнитосферном хвосте Земли. На основании анализа данных о структуре наклонных токовых слоев, полученных на аппарате Cluster (отобрано 29 случаев пересечения токового слоя), установлено, что в наклонных слоях ток переносится, главным образом, замагнитченными электронами. При этом компонента тока, направленная вдоль магнитного поля, составляет около 60% от полного тока; сама же сонаправленная току компонента магнитного поля составляет до 50% от величины магнитного поля на границе токового слоя. Далее предложен метод выделения из наблюдаемого электрического поля составляющей, возникающей за счет разделения зарядов ионов и электронов (поле поляризации), восстановлены потенциалы полей поляризации поперек токового слоя по имеющимся данным. Показано, что более чем в половине случаев

потенциалы имеют параболический профиль с минимумом в нейтральной плоскости, а перепад потенциала между нейтральной плоскостью и границей токового слоя лежит в диапазоне от 200 В до 8 кВ. Наконец, построена самосогласованная магнитогидродинамическая модель наклонного токового слоя, в которой автор удачно соединил приближенное решение Бирна [*Birn (1991), J. Geophys. Res., 96, 19441–19450*] с феноменологической моделью магнитного поля в наклонном токовом слое [*Petrukovich et al. (2008), Ann. Geophys., 26, 3669–3676*]. Построенное решение подтвердило параболический профиль потенциала электрического поля поляризации.

В четвертой главе оценивается длина магнитосферного хвоста Венеры. Идея заключается в том, что при обтекании Венеры силовые трубки солнечного ветра деформируются за счет торможения в области магнитного барьера и загрузки ионосферной плазмой. После «соскальзывания» с поверхности планеты (ионосферы) эти силовые трубки имеют геометрию растянутой рогатки, нацеленной от планеты в хвост. Центральные части силовых трубок движутся с ускорением за счет силы натяжения магнитных силовых линий, в то время как концы трубок движутся с постоянной скоростью равной скорости солнечного ветра. В связи с этим на некотором расстоянии от планеты, которое, собственно, и требуется определить, силовая трубка распрямляется, а магнитосферный хвост с характерной геометрией силовых линий заканчивается. Характерные параметры скорости плазмы и магнитного поля заданы по данным измерений аппарата *Pioneer Venus Orbiter*, растянутость трубки оценена из геометрических соображений. А именно, на расстоянии 12 радиусов Венеры (R_V) от планеты скорость плазмы равна скорости солнечного ветра, 400 км/с, а растянутость трубки в этот момент оценивается в $10 R_V$. В такой постановке задача сведена к квазиодномерной, и из системы магнитогидродинамических уравнений получена система из двух уравнений, описывающих движение вершины силовой трубки и эволюцию ее растянутости в зависимости от положения вершины. Поскольку толщина токового слоя хвоста магнитосферы Венеры не известна, решения получены для двух предельных случаев – тонкого токового слоя (толщиной $0.25 R_V$) и широкого ($2.5 R_V$). Найдено, что в широком токовом слое силовая трубка распрямляется примерно за 360 с на расстоянии $44 R_V$ от планеты, при этом скорость вершины силовой трубки в момент распрямления составляет около 600 км/с. В тонком токовом слое соответствующие параметры равны 160 с, $31 R_V$ и 900 км/с. Показано также, что на характерных временах задачи можно пренебречь эффектами, связанными с убеганием из силовой трубки частиц с малыми питч-углами и загрузкой трубки частицами плазмы магнитослоя.

Пятая глава посвящена исследованию поперечной структуры токового слоя в магнитосферном хвосте Венеры на основании данных аппарата Venus Express. Показано, что в половине случаев поперечные профили компоненты магнитного поля, направленной вдоль хвоста, хорошо аппроксимируются моделью Харриса; в другой половине случаев более адекватной является аппроксимация моделью двухмасштабного токового слоя. Обсуждаются возможные причины такой структуры магнитного поля: а) неравномерность движения токового слоя; б) тонкий токовый слой формируется двухкомпонентной (протоны, ионы кислорода) плазмой по аналогии с магнитосферным хвостом Земли, где такие структуры уже наблюдались. Для второго варианта адаптирована модель двухкомпонентного токового слоя [Zelenyi et al. (2006), *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05105], получены физически разумные оценки параметров плазмы, в частности температуры протонов и ионов кислорода, для наблюдаемых профилей магнитного поля. Установлено, что толщина токового слоя составляет несколько ионных гирорадиусов. К сожалению, в связи с недостатком данных пока невозможно утверждать однозначно, какой из двух вариантов, а) или б), реализуется в действительности.

Заключение диссертации содержит краткую сводку полученных результатов.

Главные результаты диссертационной работы И. Ю. Васько содержатся в первой главе диссертации. Токовые слои являются структурами, играющими роль энергетического резервуара в космической и лабораторной плазмах. В связи с этим проблема устойчивости токовых слоев является одной из основных проблем физики плазмы, для изучения которой крайне важен анализ структуры равновесных конфигураций. Несмотря на то, что уравнение Грэда-Шафранова, являющееся ключевым при описании плазменных равновесий, известно уже более полувека, набор его точных решений, соответствующих магнитосферным токовым слоям, крайне ограничен. До сих пор были известны решения лишь для плоских токовых слоев с максвелловской функцией распределения частиц. Автору удалось расширить класс таких решений, а также получить решение для степенной функции распределения, что особенно важно для изучения магнитосфер земного типа, поскольку в магнитосфере Земли подобные распределения были уже неоднократно зафиксированы. Кроме того, впервые получены решения для осесимметричного токового слоя, каковым является, например, магнитодиск Юпитера. Таким образом, решения, полученные И. Ю. Васько, существенно расширяют инструментарий исследования магнитосфер планет солнечной

системы, комет, экзопланет, и др. Не исключено также применение этих решений к задачам о равновесии плазмы в токамаках.

Актуальными проблемами, исследованными в диссертации, являются:

- а) кинетические модели плазменных токовых слоев;
- б) механизм генерации ускоренных частиц в магнитосфере с сильно меняющейся топологической структурой на примере магнитосферы Нептуна;
- в) структура потенциала электрического поля поляризации плазмы в наклонных токовых слоях;
- г) структура магнитосферного хвоста Венеры.

Практическая ценность работы состоит в построении новых точных решений уравнения Грэда-Шафранова для двумерных плоских и осесимметричных равновесных конфигураций при максвелловском и степенном распределениях частиц плазмы. В частности, осесимметричные токовые слои формируются в магнитосферах быстровращающихся планет при наличии во внутренней магнитосфере источников плазмы, – например, магнитодиски Юпитера и Сатурна; могут формироваться в магнитосферах пульсаров, а также в магнитосферах экзопланет, называемых "горячими Юпитерами". Формирование плоских токовых слоев характерно для магнитосферных хвостов планет солнечной системы, комет, солнечной короны и солнечного ветра. Предложенный механизм ускорения заряженных частиц в магнитосферном хвосте Нептуна может реализовываться в магнитосферах пульсаров и экзопланет, у которых магнитный диполь сильно наклонен к оси вращения и к направлению потока звездного ветра. Полученные профили электростатического потенциала важны для понимания структуры наклонных токовых слоев, а также с точки зрения верификации будущих моделей деформированных токовых слоев в магнитосферных хвостах планет земного типа. Разработанная методика оценки длины магнитосферного хвоста Венеры может быть применена для оценки длины магнитосферных хвостов космических тел, не обладающих собственным магнитным полем.

Достоверность полученных результатов первой главы обеспечивается тем, что полученные решения являются точными аналитическими решениями системы уравнений Власова-Максвелла. Достоверность результатов остальных глав подтверждается согласием теоретических оценок с данными численного моделирования (глава 2) и

данными непосредственных спутниковых наблюдений (главы 2–5). В связи с этим значимость полученных результатов не вызывает сомнения. Тем не менее, необходимо отметить, что работа не лишена некоторых недостатков.

Так, решения для осесимметричных токовых слоев, полученные в первой главе работы, не соответствуют характерной дипольной особенности ($B_z|_{r \rightarrow 0} \sim r^{-3}$), обеспечивая $B_z|_{r \rightarrow 0} \sim r^{-\delta}$, где δ не превышает двух. Не учитывается также эффект неполной коротации плазмы, могущий играть заметную роль, скажем, в структуре магнитодиска Юпитера.

Во второй главе за рамками исследования оказались некоторые вопросы, вообще говоря, заслуживающие рассмотрения. Во-первых, индукционные электрические поля, за счет которых происходит ускорение частиц, должны иметь продольную к магнитному полю компоненту, существенно влияющую на процесс ускорения заряженных частиц. В данной работе эта компонента индукционного электрического поля исключается из рассмотрения на основании общего утверждения о том, что она должна почти полностью компенсироваться электрическим полем поляризации плазмы, так что потенциал суммарного продольного электрического поля составляет малую (в условиях рассматриваемой задачи) величину порядка электронной температуры. Автор ссылается на оценку, полученную в работе [Delcourt (2002), *JASTP*, 64, 551–559], посвященной исследованию ускорения частиц во внутренней магнитосфере Земли в процессе суббуравовой диполяризации. Однако стоит учесть, что цитируемая оценка продольного электрического поля была получена при определенных ограничивающих предположениях, в частности при условии изотермичности электронной компоненты плазмы. Кроме того, возможны некоторые специфические эффекты, как, например, аномальное ускорение ионов за счет квази-резонансного взаимодействия с распространяющимися фронтами электрического потенциала [Mauk (1989), *J. Geophys. Res.*, 94, 8911–8920]. В связи с этим продольное электрическое поле и определяемое им ускорение частиц требуют, вообще говоря, более строгого математического описания, или, как минимум, более детального обсуждения накладываемых ограничений и предположений.

Во-вторых, топологическая перестройка конфигурации магнитосферы, весьма вероятно, может приводить к развитию процессов магнитного пересоединения, сопровождаемых как дополнительным ускорением ионов, так и формированием открытых силовых трубок, через которые плазма может беспрепятственно покидать магнитосферу. Этот аспект остался также за рамками рассмотрения предложенной модели. Таким образом,

развитая модель ускорения частиц в магнитосфере Нептуна может рассматриваться как некое нулевое приближение, хотя и содержательное, но требующее дальнейшего уточнения.

Недостатком модели наклонного токового слоя, предложенной в третьей главе диссертации, является то, что модель описывает именно сильно наклоненный слой и только его. Однако такие конфигурации токовых слоев возникают в результате распространения по слою нелинейных волн, т.н., флэппинг-колебаний, о чем говорится и в диссертационной работе. Это означает, что модель деформированного токового слоя должна самосогласованно описывать именно такую волнообразную конфигурацию, в которой наклон слоя является квазипериодической функцией координат и времени. Таким образом, построенная автором модель деформированного токового слоя является неполной.

В четвертой главе автор рассматривает задачу о распрямлении магнитной силовой трубки в хвосте магнитосферы Венеры, и наиболее узким местом этой задачи является задание начальной конфигурации магнитной силовой трубки. На основании работы [Зеленый и Вайсберг (1982), *Космические исследования*, 4, 604–619], в которой построена модель формирования плазменной мантии и магнитосферы Венеры, автор оценивает начальное растяжение в $10 R_V$. В то же время в следующей работе тех же авторов [Vaisberg & Zeleny (1984), *ICARUS* 58, 412–430], развивающей результаты предыдущей, расстояние, на котором ионы магнитосферного хвоста ускоряются до скорости солнечного ветра, оценивается в $200 R_V$. Но по данным аппарата PVO [McComas et al. (1986), *J. Geophys. Res.*, 91, 7939–7953], используемым автором диссертации, это расстояние составляет лишь $12 R_V$. Столь значительное – двадцатикратное – отличие между аналитической оценкой и спутниковыми данными вынуждает поставить под сомнение и достоверность оценки растянутости магнитной силовой трубки. Вероятно, более достоверное значение могло бы быть получено с помощью трехмерного моделирования обтекания Венеры солнечным ветром, что, конечно, выходит за рамки представленной работы. Поэтому, несмотря на достаточно корректное решение автором поставленной задачи, сами результаты, возможно, не являются окончательными.

Указанные замечания не меняют в целом положительную оценку диссертации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 5 в рецензируемых журналах из списка ВАК. Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и обсуждались на научных семинарах. Автореферат диссертации адекватно представляет ее содержание. Тема исследования соответствует заявленной научной специальности.

На основании вышеизложенного можно считать, что диссертация И. Ю. Васько соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК и может рассматриваться как завершенная научно-квалификационная работа. Автор работы, И. Ю. Васько, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Диссертационная работа Васько И. Ю. была обсуждена и одобрена на научном семинаре кафедры Физики Земли физического факультета Санкт-Петербургского Государственного Университета 14 марта 2014 года, протокол № 22.

Отзыв ведущей организации составил стажер-исследователь СПбГУ, к. ф.-м. наук Д. Б. Коровинский.

Стажер-исследователь СПбГУ,
к. ф.-м. наук



Д. Б. Коровинский

Заведующий кафедрой Физики Земли СПбГУ,
д. ф.-м. наук, профессор



В.С. Семенов