

На правах рукописи

Евгений Валентинович ПАНОВ

**ИЗУЧЕНИЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ НА ГРАНИЦЕ
МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ЧЕТЫРЕХ
СПУТНИКОВ КЛАСТЕР**

01.03.03 – физика Солнца

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**



Москва 2007

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и Институте изучения солнечной системы им. Макса Планка (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, MPS)

Научные руководители:
д.ф.- м.н. С.П. Савин (ИКИ РАН)
проф. Й. Бюхнер (MPS)

Официальные оппоненты:
к.ф.- м.н., В.Л. Красовский (ИКИ РАН)
д.ф.- м.н., И.И. Алексеев (Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова)

Ведущая организация:
Институт земного магнетизма Российской академии наук

Защита состоится 6 апреля 2007 г. в 12 ч. 30 мин. на заседании Диссертационного Совета Д 002.113.03 ИКИ РАН по адресу, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН
Автореферат разослан 5 марта 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
к.ф.-м.н. Буринская Т.М.



1. Общая характеристика работы

Актуальность темы

Первые односпутниковые космические эксперименты, запущенные для изучения физических явлений в плазме Солнечной системы, открыли солнечный ветер, переходные области (магнитослои), компоненты планетных магнитосфер. Кроме того, эти эксперименты показали, что разные плазменные области разделены разрывами, например, в виде ударных волн, магнитопауз или плазмапауз.

Вместе с тем, односпутниковые эксперименты выявили сильные флуктуации параметров плазмы и электромагнитного поля во многих исследуемых областях. К сожалению, по измерениям в одной точке пространства в данный момент времени невозможно разделить пространственные вариации параметров от временных. Таким образом, односпутниковые эксперименты не дают определять частные производные измеряемых параметров. Малочисленные двухспутниковые наблюдения позволили определять пространственные производные только в одном измерении – в проекции на линию, соединяющую два спутника. Для изучения внешней границы магнитосферы Земли – магнитопаузы – и связанных с ней физических процессов это означало неопределенность в оценке скорости и толщины магнитопаузы, а также плотности тока в токовом слое магнитопаузы. Кроме того, нельзя было определить, являются ли флуктуации электромагнитного поля на магнитопаузе волнами или это характерная структура магнитопаузы.

Запуск Европейским космическим агентством в 2000 г. четырех идентичных аппаратов КЛАСТЕР (CLUSTER) (<http://clusterlaunch.esa.int/>), образующих тетраэдр, и собранные ими данные на разных расстояниях между спутниками впервые позволили разделять пространственные и временные флуктуации моментов функций распределения плазмы и электромагнитного поля на разных масштабах, систематически определять скорость и толщину магнитопаузы, полный вектор плотности тока, проходящего через объем, заключенный внутри граней тетраэдра КЛАСТЕР, а также величину и направление волнового вектора возмущений в электромагнитном поле на частотах до ~ 2 Гц*. Таким образом, КЛАСТЕР предоставляет принципиально новые возможности, в частности, для изучения физических процессов, связанных с внешней границей магнитосферы Земли.

* Ограничение по частоте зависит от расстояния между аппаратами. При длине волны меньше этого расстояния появляется неоднозначность в определении волнового вектора.

Цель работы

Целью диссертации является исследование по данным четырех аппаратов КЛАСТЕР на средних и высоких широтах магнитосферы Земли:

- параметров плазмы и магнитного поля в окрестности магнитопаузы,
- ориентации, скорости, толщины и плотности тока магнитопаузы,
- структуры магнитопаузы,
- свойств электромагнитной турбулентности в окрестности магнитопаузы,
- механизмов проникновения плазмы магнитослоя через магнитопаузу.

Научная новизна

Результаты исследования параметров плазмы и магнитного поля в окрестности магнитопаузы, для получения которых не требовались наблюдения несколькими аппаратами, получены впервые статистически достоверным образом, то есть в виде функций распределения соответствующих величин.

Результаты диссертации, которые могли быть получены только с привлечением многоспутниковых методов анализа, являются новыми.

Научная и практическая ценность работы

Исследование толщины магнитопаузы показало необходимость пересмотра имеющихся моделей токового слоя между двумя замагниченными плазмами, основанных на линейных кинетических эффектах, которые предсказывают, что толщина слоя должна быть порядка ионного ларморовского радиуса. В новые модели, вероятно, должны быть включены нелинейные кинетические эффекты, которые приводят к переносу ионов через токовый слой за счет взаимодействия волна-частица, что, возможно, позволяет расширить токовый слой магнитопаузы.

Регулярное обнаружение пересечений магнитопаузы, где изменение направления магнитного поля происходит на масштабах, в несколько раз меньших градиента основной компоненты магнитного поля, говорит о необходимости пересмотра подхода к определению толщины токового слоя магнитопаузы. За толщину следует принимать масштаб изменения направления магнитного поля в плоскости токового слоя магнитопаузы.

Оценки коэффициентов диффузии протонов магнитослоя в магнитосферу за счет взаимодействия волна-частица из наблюдений вблизи нижнегибридной частоты и протонно-циклотронной частоты, найденные из амплитуд флуктуаций магнитного поля и плотности тока, на два порядка превосходят квазилинейные оценки. Полученные коэффициенты диффузии достаточно

велики для объяснения существования части пограничных слоев у магнитосферной границы магнитопаузы с наблюдаемыми градиентами плотности.

Результаты диссертации открывают возможность корректной постановки задачи для проведения серии численных экспериментов с целью систематического изучения возникновения плазменных неустойчивостей на токовом слое магнитопаузы Земли. Ошибка в постановке задачи равна сумме инструментальных погрешностей в данных и погрешностей методов анализа.

Результаты диссертации могут быть использованы при планировании и, далее, напрямую сопоставлены с результатами четырехспутникового проекта NASA Magnetospheric Multiscale Mission (<http://stp.gsfc.nasa.gov/missions/mms/mms.htm>), старт которого запланирован в 2013 г, а также в подготовке предложения ESA по запуску 12-спутникового проекта Cross-Scale (<http://www.cross-scale.org/>). В частности, автор диссертации считает необходимым внести в программу интервал наблюдений с расстояниями между спутниками от сотен метров до нескольких километров. Это обеспечило бы возможность изучения дисперсионных свойств электростатических флуктуаций на нижнегибридной частоте вплоть до ~100 Гц.

Апробация работы

Результаты диссертации опубликованы в статьях, прошедших процедуру реферирования квалифицированными в отрасли специалистами международного уровня в журналах РФ, ЕС и США.

Кроме того, результаты диссертации представлены устно во время проведения летней школы «Методы анализа турбулентной плазмы» (Analysis Techniques for Turbulent Plasmas) в 2004 г., на ассамблее Европейского геофизического союза (European Geophysical Union, EGU) в 2005 г., на конференциях Немецкого физического общества (Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG) в 2005 и 2006 г.г., на ассамблее международного Комитета по космическим исследованиям (Committee on Space Research, COSPAR) в 2006 г., а так же на семинарах ИКИ РАН и MPS.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации, были получены лично автором диссертации при поддержке научных руководителей и других соавторов публикаций на основе данных приборов, которые были спроектированы, изготовлены, юстированы и размещены на борту четырех аппаратов КЛАСТЕР группами разработчиков инструментов.

2. Содержание работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 55 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 130 статей.

Во введении обсуждаются актуальность и цель работы; ставятся открытые вопросы и намечается путь их решения с помощью новых методов анализа данных, собранных четырьмя идентичными аппаратами КЛАСТЕР.

В главе 1 объясняются принципы работы инструментов на борту КЛАСТЕР, измеряющих магнитное и электрическое поля, а так же функции распределения скоростей ионов. Кроме того, описаны используемые системы координат и методы анализа данных.

В главе 2 исследованы параметры плазмы и магнитного поля, собранные четырьмя спутниками КЛАСТЕР во время переходов магнитослой-магнитосфера на средних и высоких широтах. Для этого использовались данные двух сезонов: с февраля 2002 г. по июнь 2002 г. и с июня 2003 г. по май 2004 г. В эти периоды расстояние между спутниками было 100 и 300 км, соответственно. Это позволило провести тщательный многоспутниковый анализ внешней границы магнитосферы. Исследование было сосредоточено как на характеристиках плазмы и магнитного поля со стороны прилегающего магнитослоя и в магнитосфере, так и на ориентации, движении и толщине токового слоя магнитопаузы, идентифицированного по характерному изменению направления вектора магнитного поля.

Во-первых, были проанализированы характеристики плазмы и магнитного поля для всех имеющихся за два сезона 154 переходов магнитослой-магнитосфера. В процессе анализа были использованы моменты функций распределения ионов, измеренные раз в 4 секунды, и данные магнитного поля с тем же временным разрешением. Подобный переход длится от десятков минут до часов. Причем, в одном переходе магнитопауза может быть пересечена много раз и при переходе через разные пограничные области. Переходы магнитослой-магнитосфера были разделены на три основные группы: 1) в дневную магнитосферу с прилегающим погранслоем низкоширотного типа или «входным слоем» 2) в касп, 3) в магнитосферную долю и плазменную мантию, а так же две смежные группы, когда в одном переходе встречается либо группы 1) и 2) одновременно, либо группы 2) и 3) одновременно.

Найдено, что поток плазмы магнитослоя двигался, в среднем, с альфвеновской скоростью. Тем не менее, плазма магнитослоя двигалась преимущественно со сверхальфвеновской скоростью над дневной магнитосферой и в основном с субальфвеновской скоростью над магнитосферной долей. При движении от дневной магнитосферы к магнитосферной доле плазма магнитослоя нагревается. Отношение теплового давления плазмы к магнитному (плазменный параметр β) в магнитослое было, в

среднем, близко к единице, т.е. тепловое и магнитное давления находились в равновесии. При этом у магнитосферной доли плазменный параметр β был, в среднем, в четыре раза больше, чем у дневной магнитосферы за счет указанного нагрева плазмы при переходе за касп.

Плотность плазмы магнитослоя может быть от нескольких частиц до нескольких десятков частиц в см^3 . При этом среднее значение соответствует $\sim 15\text{-}20 \text{ см}^{-3}$. Температура плазмы магнитослоя варьируется в пределах $\sim 0.1\text{-}1$ кэВ. Плотность ионов в магнитосфере варьируется в пределах $\sim 0.01\text{-}10 \text{ см}^{-3}$ с средним значением $\sim 1 \text{ см}^{-3}$ в дневной магнитосфере и $\sim 0.1 \text{ см}^{-3}$ в магнитосферной доле. Средняя температура в дневной магнитосфере (~ 4 кэВ) существенно выше, чем в магнитосферной доле (~ 0.1 кэВ). Среднее отношение температуры в магнитосфере к температуре в магнитослое равно ~ 15 у дневной магнитосферы и ~ 0.2 у магнитосферной доли. Тепловое давление плазмы магнитослоя над дневной магнитосферой примерно в два раза ниже, чем над магнитосферной долей. Было так же обнаружено, что лобовое давление потока магнитослоя компенсирует вплоть до 75% давления магнитного поля в магнитосфере Земли у дневной магнитопаузы. Остальные 25% скомпенсированы тепловым давлением плазмы магнитослоя. В отличие от этого, над каспом и позади него над магнитосферной долей лобовое давление магнитослоя компенсирует только до 50% давления магнитного поля Земли. В то же время, тепловое и магнитное давления магнитослоя компенсируют примерно поровну остальные 50% давления магнитного поля Земли.

Напряженность магнитного поля в прилегающем к магнитопаузе магнитослое может быть в 8 раз меньше, чем напряженность магнитного поля со стороны магнитосферы. Однако, примерно в 40% из 154 случаев перехода магнитослой-магнитосфера, напряженность магнитного поля в магнитослое была примерно равна напряженности магнитного поля со стороны магнитосферы. Таким образом, было подтверждено, что в среднем положение магнитопаузы есть результат суммарного равновесия давлений, требуемого тангенциальным разрывом. Нужно отметить, однако, что примерно в 15% случаев, в основном у дневной магнитосферы, напряженность магнитного поля в магнитосфере меньше, чем в прилегающем магнитослое. При этом наблюдается сильное нарушение баланса давлений, что говорит о нестационарности магнитопаузы.

Далее были выявлены наиболее вероятные углы поворота вектора магнитного поля при переходе из магнитослоя в магнитосферу в местах пролета аппаратов КЛАСТЕР. Найдено, что случаев с параллельно- или антипараллельно-направленными векторами магнитного поля в магнитослое и магнитосфере практически нет. Наиболее часто встречаемыми оказались углы ~ 75 и ~ 135 градусов. Эти значения соответствуют северному и южному направлению межпланетного магнитного поля, соответственно.

Чтобы лучше понять формирование токового слоя магнитопаузы вокруг каспа были исследованы более детально 52 случая пересечения магнитопаузы четверкой аппаратов КЛАСТЕР на высоких широтах с дневной стороны и со стороны хвоста. Токовый слой магнитопаузы идентифицировался по четкому изменению направления вектора магнитного поля, а также по соответствующим пограничным слоям. Орбита КЛАСТЕР редко позволяла наблюдать плазменную мантию в северной части магнитосферы. Наиболее часто у магнитопаузы был обнаружен прилегающий пограничный слой, аналогичный наблюдаемому на низких широтах (38 из 52 случаев). Плазменная мантия наблюдалась в 11 случаях. «Входной слой» был идентифицирован лишь в трех случаях пересечения магнитопаузы, которые произошли в северной части магнитосферы.

Для всех 52 случаев пересечения магнитопаузы была определена ориентация токового слоя магнитопаузы. В 90% случаев, когда был обнаружен четкий токовый слой магнитопаузы, угол между направлениями магнитного поля в магнитослое и магнитосфере превышал 40 градусов. Этот факт находится в соответствии с опубликованными ранее результатами для низких широт.

Для 52 случаев пересечения магнитопаузы также были определены скорость и толщина токового слоя. Обнаружено, что магнитопауза на высоких широтах движется со скоростью от почти нулевой до ~ 180 км/с в направлении, перпендикулярном токовому слою магнитопаузы, как в сторону сжатия, так и в сторону расширения магнитосферы. Медиана распределения скоростей магнитопаузы соответствует ~ 50 км/с, а среднее значение ~ 60 км/с. Максимальная обнаруженная скорость, с которой двигалась магнитопауза на средних и высоких широтах примерно в три раза меньше, а среднее значение скорости примерно в 1.3 раза меньше, чем соответствующие значения скорости магнитопаузы на низких широтах. Найдено, что магнитопауза с прилегающей плазменной мантией движется ещё медленнее - со скоростями, не превышающими 70 км/с.

Обнаружено, что токовый слой магнитопаузы варьируется от ~ 50 км до $\sim 10^5$ км, с медианой распределения ~ 800 км и средним значением ~ 1600 км. Таким образом, магнитопауза на высоких широтах почти в два раза толще, чем на низких широтах (~ 900 км). Заметим, что в данной диссертации толщина магнитопаузы соответствует длине градиента в V_L компоненте магнитного поля, т.е. компоненте магнитного поля коллинеарной направлению максимума вариаций магнитного поля при пересечении токового слоя магнитопаузы. Относительная толщина магнитопаузы, нормированная на локальный ларморовский радиус протона в магнитослое ρ лежит в диапазоне от 1ρ до 200ρ , с медианой распределения около 10ρ . Таким образом, найдено, что только в двух из 52 случаев пересечения магнитопаузы толщина токового слоя примерно соответствовала ρ . Заметим, что на низких широтах средняя толщина

магнитопаузы соответствует примерно 10ρ . Таким образом, магнитопауза на высоких широтах в среднем в три раза толще в терминах ρ ($\sim 30\rho$).

Далее, была посчитана плотность тока на токовом слое магнитопаузы напрямую из ротора магнитного поля. Найдено, что плотность тока варьируется от 50 нА/м^2 до 1.3 мкА/м^2 , с медианой распределения $\sim 200 \text{ нА/м}^2$ и средним значением $\sim 600 \text{ нА/м}^2$. Плотность тока на магнитопаузе с прилегающей плазменной мантией выше, чем на магнитопаузе, покрывающей дневную магнитосферу. Найдено, что в среднем толщина магнитопаузы L_B , скачек в B_L компоненте магнитного поля ΔB_L и амплитуда J_M компоненты плотности токов на магнитопаузе соотносятся законом Ампера. В части пересечений, однако, расстояния между аппаратами были больше толщины магнитопаузы, что привело к недооценке плотности тока магнитопаузы. В другой части пересечений основной токовый слой магнитопаузы оказался тоньше, чем толщина магнитопаузы.

Наконец, было показано, что магнитопауза может иметь различную структуру. Во-первых, приведены примеры закрытой (тангенциальной) ($|\langle B_N \rangle| = 0$) и открытой магнитопаузы ($|\langle B_N \rangle| > 0$). Во-вторых, продемонстрировано, что существует два вида токового слоя магнитопаузы тангенциального типа: а) напряженность магнитного поля изменяется через слой монотонно, а ток течет только перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; поворот поля через слой происходит на всей толщине магнитопаузы. б) напряженность магнитного поля имеет минимум в центре слоя; в минимуме ток течет в основном перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; слева и справа от минимума ток в поперечном направлении ослабевает; при этом появляются продольные токи, которые противоположно направлены с двух сторон минимума; основной поворот поля через слой происходит в минимуме на масштабах в 2-3 раза меньших толщины магнитопаузы.

В главе 3 исследованы свойства магнитной турбулентности в окрестности магнитопаузы по данным высокого разрешения со спутников КЛАСТЕР с частотой опроса 22,4 и 67 Гц для 16 пересечений магнитопаузы. Установлено, что мощность флуктуаций магнитного поля тем выше, чем тоньше токовый слой магнитопаузы во всем наблюдаемом диапазоне частот (от ионно-циклотронной до нижегибридной частоты). Данная зависимость особенно четко проявляется со стороны магнитосферы и указывает на градиенты давления, как наиболее вероятный источник свободной энергии для возбуждения наблюдаемой турбулентности. Наклон спектров флуктуаций со стороны магнитослоя ($k = -2$) круче, чем со стороны магнитосферы ($k = -1.75$). Мощность флуктуаций в касательных к токовому слою магнитопаузы компонентах магнитного поля больше, чем в нормальной.

Далее, был изучен уникальный случай пересечения тонкой магнитопаузы ($L_B \sim \rho$) 30 марта 2002 г. с толщиной около 50 км, что примерно равно

ларморовскому радиусу протона в магнитослое. Для изучения тонкого токового слоя были использованы данные электрического поля с частотой опроса 450 Гц, данные магнитного поля с частотой опроса 67 Гц, а так же функции распределения скоростей ионов, измерявшихся раз в 4 секунды. Показано, что плотность токов на тонком токовом слое может достигать 2-3 мкА/м². Мощные электростатические флуктуации наблюдались на градиенте плотности на магнитосферной стороне тонкого токового слоя магнитопаузы с частотами, близкими к нижнегибридной частоте (~10-90 Гц). Так же показано, что в отличие от прилегающего магнитослоя и магнитосферы, где ионы в заморожены в межпланетное магнитное поле и в магнитное поле Земли, соответственно, на тонком токовом слое сильное перпендикулярное электрическое поле (30-40 мВ/м) сбалансировано холловским членом обобщенного закона Ома. Последнее свидетельствует о том, что наблюдаемый ненулевой поперечный ток, вероятно, является холловским. Наконец, получено, что уже флуктуации магнитного поля и тока могут привести к значениям коэффициента диффузии ионов через токовый слой магнитопаузы 5.0×10^8 м²/с, что более, чем на два порядка превышает оценку, полученную с помощью квазилинейной теории.

Наконец, был исследован случай пересечения толстой магнитопаузы ($L_B > \rho$) на высоких широтах 10 мая 2002 г. с толщиной ~450 км (пять ларморовских радиусов протона магнитослоя). Неоднородность в B_M компоненте магнитного поля имела форму биполярного возмущения, образуя основной токовый слой на масштабах ~130 км. На магнитопаузе и в прилегающем пограничном слое наблюдались существенные флуктуации магнитного поля на частоте, близкой к локальной ионно-циклотронной частоте f_{rc} (~0.4-2 Гц). Показано, что этим флуктуациям соответствуют волны длиной около 150-250 км, которые распространяются в сторону Земли, перпендикулярно плоскости токового слоя магнитопаузы. Функции распределения протонов показывают, что протоны магнитослоя влетают в магнитосферу перпендикулярно плоскости токового слоя магнитопаузы с фазовой скоростью наблюдаемых электромагнитных волн и образуют пограничный слой. Сделана оценка коэффициента диффузии за счет флуктуаций магнитного поля и плотности тока вблизи ионно-циклотронной частоты 2.0×10^6 м²/с. Показано, что этого достаточно для образования наблюдаемого прилегающего пограничного слоя. Полученный коэффициент диффузии на два порядка превышает оценку, произведенную с помощью квазилинейной теории. Таким образом, показано, что пограничный слой мог быть образован благодаря бесстолкновительной диффузии протонов магнитослоя вследствие взаимодействия волна-частица.

Положения, выносимые на защиту

1. Установившееся на средних широтах сверхальфвеновское течение плазмы магнитослоя замедляется до субальфвеновских скоростей над Каспием и за ним. При этом тепловое и магнитное давление увеличиваются в 2-4 раза.
2. На средних и высоких широтах а) скорость магнитопаузы не превосходит 180 км/с (в три раза медленнее, чем на низких широтах), имея среднее 60 км/с (в 1.3 раза медленнее, чем на низких широтах) и медиану 50 км/с. Скорость магнитопаузы с прилегающей мантией меньше – не превышает 70 км/с. Толщина магнитопаузы может быть от 50 до 6000 км, со средним 1600 км (в 1.8 раза толще, чем на низких широтах) и медианой 800 км. Магнитопауза с прилегающей мантией, в среднем, в два раза тоньше, чем дневная магнитопауза. В гирорадиусах протона r_p средняя толщина была $30r_p$ (в 3 раза толще, чем на низких широтах), а медиана $10r_p$. Плотность токов в токовом слое магнитопаузы может быть от 20 до 1300 нА/м², со средним 600 нА/м² и медианой 200 нА/м². Плотность токов магнитопаузы с прилегающей мантией, в среднем, в два раза выше, чем дневной магнитопаузы.
3. Существует два вида токового слоя магнитопаузы тангенциального типа:
а) напряженность магнитного поля изменяется через слой монотонно, а ток течет только перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; поворот поля через слой происходит на всей толщине магнитопаузы.
б) напряженность магнитного поля имеет минимум в центре слоя; в минимуме ток течет в основном перпендикулярно направлению максимума вариации магнитного поля; слева и справа от минимума ток в поперечном направлении ослабевает; при этом появляются продольные токи, которые противоположно направлены с двух сторон минимума; основной поворот поля через слой происходит в минимуме на масштабах в 2-3 раза меньших толщины магнитопаузы.
4. Мощность флуктуаций магнитного поля вблизи магнитопаузы увеличивается с уменьшением толщины магнитопаузы во всем наблюдаемом диапазоне частот (от ионно-циклотронной до нижнегибридной частоты). Мощность флуктуаций в касательных к магнитопаузе компонентах поля больше, чем в нормальной компоненте.
5. Вероятным механизмом переноса протонов в магнитосферу через тонкую магнитопаузу (один гирорадиус протона магнитослоя) является взаимодействие волна-частица вблизи нижнегибридной частоты. Наблюдаемые амплитуды флуктуаций магнитного поля и плотности тока могут привести к коэффициенту диффузии около 5.0×10^8 м²/с, что на два порядка больше квазилинейной оценки.

6. Вероятным механизмом переноса протонов из магнитослоя в магнитосферу через толстую магнитопаузу является взаимодействие волна-частица вблизи ионно-циклотронной частоты. Наблюдаемые амплитуды флуктуаций магнитного поля и плотности тока могут привести к коэффициенту диффузии около 2.0×10^6 м²/с, что на два порядка больше квазилинейной оценки.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах в российских и зарубежных реферируемых журналах:

1. Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Khotyaintsev, Y., Nikutowski, B., Savin, S.P., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. CLUSTER spacecraft observation of a thin current sheet at the Earth's magnetopause. *Adv. Space Res.* (2005), V. 37, PP. 1363-1372, doi:10.1016/j.asr.2005.08.024.
2. Panov, E.V., Büchner, J., Fränz, M., Korth, A., Savin, S.P., Fornaçon, K.-H., Dandouras, I., Rème, H. CLUSTER observation of collisionless transport at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.* (2006), V. 33, PP. L15109(1-5), doi:10.1029/2006GL026556.
3. Е.В. Панов, С.П. Савин, Й. Бюхнер, А. Корт О толщине токового слоя внешней границы магнитосферы по данным четырех спутников CLUSTER. *Косм. исслед.* (2007), Т.45, С. 284-288.

Автор диссертации принимал участие в слудующих работах на другие темы:

1. Panov, E.V., Amossov, S.A. Estimation of the guarantee fund sufficiency for the derivatives exchange, *Derivatives Use, Trading & Regulation* (2005) V. 10, PP. 361-372.
2. Savin, S., Zelenyi, L., Amata, E., Buechner, J., Blecki, J., Greco, A., Klimov, S., Lopez, R.E., Nikutowski, B., Panov, E.V., Pickett, J., Rauch, J.L., Romanov, S., Song, P., Skalsky, A., Smirnov, V., Taktakishvili, A., Veltry, P., Zimbardo, G. Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause: Dynamic flow chaotization *Pl. Space Sci.* (2005) V. 53, P. 133-140, doi: 10.1016/j.pss.2004.09.037
3. Savin, S., Skalsky, A., Zelenyi, L., Avonov, L., Borodkova, N., Klimov, S., Lutsenko, V., Panov, E.V., Romanov, S., Smirnov, V., Yermolaev, Y., Song,

P., Amata, E., Consolini, G., Fritz, T.A., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Farrugia, C., Maynard, N., Pickett, J., Sauvaud, J.A., Rauch, J.L., Trotignon, J.G., Khotyaintsev, Y., Stasiewicz, K. Magnetosheath Interaction with the High Latitude Magnetopause *Surv. Geophys.* (2005) V. 26, P. 95-133, doi. 10.1007/s10712-005-1874-4

4. Savin, S., Amata, E., Andre, M., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Decreau, P.M.E., Rauch, J.L., Trotignon, J.G., Buechner, J., Nikutowski, B., Blecki, J., Skalsky, A., Romanov, S., Zelenyi, L., Buckley, A.M., Carozzi, T.D., Gough, M.P., Song, P., Reme, H., Volosevich, A., Alleyne, H., Panov, E.V. Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer. *Nonlin. Process. Geophys.* (2006) V. 13, P. 377-392.
5. Kuznetsov, E.A., Savin, S.P., Amata, E., Dunlop, M., Khotyaintsev, Y., Zelenyi, L.M., Panov, E.V., Büchner, J., Romanov, S.A., Blecki, J., Rauch J.L., Nikutowski, B. Strong space plasma magnetic barriers and Alfvénic collapse *J. Exp. Theor. Phys. Lett.* (2007) V.85, P. 288-293.