

На правах рукописи

Рахманова Людмила Сергеевна

ДИНАМИКА БЫСТРЫХ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСЛОЕ

01.03.03 – физика Солнца

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук



Москва 2019

Работа выполнена в Институте космических исследований Российской академии наук

Научные руководители

д.ф.- м.н., ведущий научный сотрудник ИКИ РАН Застенкер Георгий Наумович,

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИКИ РАН Рязанцева Мария Олеговна

Официальные оппоненты:

д.ф.- м.н., Федоров Евгений Николаевич (ИФЗ РАН)

д.ф.- м.н., Чашей Игорь Владимирович (ПРАО АКЦ ФИАН)

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Университет (СПбГУ)

Защита состоится «22» мая 2019 г. в 11 часов

на заседании Диссертационного Совета Д 002.113.03 Института космических исследований
РАН по адресу, Москва, Профсоюзная ул., 84/32, 2-й подъезд, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

/Буринская Т.М./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Магнитослой, расположенный непосредственно за фронтом околоземной ударной волны, является переходной областью между плазмой солнечного ветра и магнитосферой. Любое возмущение плазмы или магнитного поля солнечного ветра перед воздействием непосредственно на магнитосферу проходит через магнитослой и может подвергаться видоизменениям в этой области. Таким образом, исследование процессов, происходящих в магнитослое, является важным для оценки гелиогеофизической обстановки.

На данный момент в большинстве моделей, рассматривающих влияние солнечного ветра на процессы внутри магнитосферы, в качестве входных параметров используются значения характеристик межпланетной плазмы и магнитного поля, измеренные в точке либрации L1 (см. обзор Петрукович и др., 2016). Однако явления, наблюдающиеся в переходной области, могут приводить к дополнительным возмущениям плазмы и магнитного поля, которые не будут учтены в предсказаниях моделей. В работах (Šafránková et al., 2009; Пулинец и др., 2014) было показано, что один из геоэффективных параметров межпланетной среды - знак B_z компоненты магнитного поля - у магнитопаузы часто может не совпадать со знаком B_z в солнечном ветре. Было показано также, что быстрые вариации положения магнитопаузы могут быть вызваны вариациями динамического давления в магнитослое при отсутствии подобных вариаций в солнечном ветре (Николаева и др., 1998). Считается, что знак B_z компоненты межпланетного магнитного поля и динамическое давление плазмы солнечного ветра являются наиболее геоэффективными параметрами (напр., Borodkova et al., 1995; Sibeck & Gosling, 1996; Yagova et al., 2007; Zolotukhina et al., 2007). Кроме того, скорость и плотность солнечного ветра также может оказывать влияние на процессы, происходящие во внутренней магнитосфере (напр., Sergeev et al., 2015, 2018). Соответственно, необходимо учитывать, как вышеуказанные параметры могут изменяться в магнитослое по сравнению с солнечным ветром.

На околоземной ударной волне плазма солнечного ветра замедляется, нагревается, становится более плотной и меняет направление движения. Описание течения плазмы в магнитослое с помощью магнитогидродинамических моделей (напр., Spreiter & Stahara, 1980; Kartalev et al., 1996; Samsonov et al., 2001; Toth et al., 2005) позволяет получить оценки средних значений параметров плазмы и магнитного поля. Однако, подобные модели не могут предсказать появление быстрых и больших по амплитуде флуктуаций параметров (напр., Zastenker et al., 2005; Nemecek et al., 2000; Hayosh et al., 2006), которые, как правило, имеют

кинетическую природу. Таким образом, особый интерес представляет изучение процессов, происходящих на малых масштабах, порядка гирорадиуса протона, на которых кинетические эффекты начинают играть существенную роль. Кроме того, на основе многочисленных измерений характеристик плазмы и магнитного поля в магнитослое было показано, что в этой области наблюдается совокупность нелинейных процессов (напр., Schwartz et al., 1996). С учетом вышесказанного, использование данных из точки L1, без учета прохождения плазмы через магнитослой, может приводить к неточностям предсказаний отклика магнитосферы на события в межпланетной среде.

Для параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое характерен высокий уровень флуктуаций в широком диапазоне частот, что свидетельствует о турбулентности плазмы в этой области. Турбулентность наблюдается как в плазме солнечного ветра (см. обзор Bruno & Carbone, 2013), так и в плазме магнитослоя, однако для переходной области характерна более высокая мощность флуктуаций. Исследования турбулентности в магнитослое активно проводятся в течение последних 20 лет (напр., Lacombe et al., 1997; Shevyrev & Zastenker, 2005; Alexandrova et al., 2006; Huang et al., 2014, 2017). Считается, что структуры плазмы и магнитного поля с масштабами более гирорадиуса протона подчиняются, в среднем, колмогоровскому скейлингу, т.е. наблюдается каскад энергии от больших масштабов к малым с образованием спектра $\sim k^{-5/3}$, где k - волновой вектор. Такие масштабы принято называть инерционной областью каскада, или МГД масштабами. В последнее время все больше исследований направлено на масштабы меньше гирорадиуса протона, так как считается, что на этих масштабах колмогоровский скейлинг нарушается. На этих масштабах, называемых диссипативной областью каскада или кинетическими масштабами, важную роль начинают играть кинетические процессы и происходит переход энергии каскада в тепло, что также невозможно предсказать на основании магнитогидродинамических моделей.

Таким образом, для улучшения предсказательной способности моделей взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой в рамках задач науки космической погоды представляется крайне важным исследовать и понять все процессы, происходящие в переходной области, в частности, на субионных масштабах.

Экспериментальные исследования характеристик плазмы и магнитного поля в магнитослое проводились с начала эры спутников, на таких космических аппаратах как IMP-1, ISEE-1,-2 AMPTE. Существенный вклад в понимание характеристик переходной области внесли спутниковые измерения, получаемые регулярно начиная с 1995 г., в частности, на российском космическом аппарате Интербол 1 (Zastenker et al., 2004). Последующие многоспутниковые миссии, такие как Themis и Cluster, в состав которых вошли приборы с улучшенным временным

и энергетическим разрешением, позволили значительно продвинуться в понимании мелкомасштабных процессов, протекающих в плазме магнитослоя (Alexandrova et al., 2006; Erickson et al., 2002; Gutynska et al., 2012; Retinò et al., 2007; Sahraoui et al., 2006).

Характеристики параметров магнитного поля в магнитослое исследованы в широком диапазоне масштабов вплоть до масштабов порядка гирорадиуса электрона (~1 км, напр., Lacombe et al., 2006; Mangeney et al., 2006), тогда как исследования параметров плазмы до недавнего времени были существенно ограничены отсутствием достаточного количества измерений с высоким временным разрешением, поэтому свойства флуктуаций параметров плазмы были изучены до масштабов порядка гирорадиуса протона (~100 км, напр., Nemecek et al., 2002; Shevyrev et al., 2003).

В 2011 году был запущен спутник Спектр-Р, в состав аппаратуры которого вошел прибор БМСВ, способный измерять плазменные параметры с временным разрешением вплоть до 31 мс. Высокое временное разрешение прибора впервые позволило исследовать флуктуации плазмы в диапазоне масштабов в окрестностях гирорадиуса протона и менее, на котором начинают проявляться кинетические свойства плазмы, а также нелинейные эффекты в плазме и диссипация энергии. Данная диссертационная работа направлена на исследование флуктуаций параметров плазмы с указанными масштабами. Понимание процессов, которые происходят на этих масштабах, представляет большую важность для корректного описания взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, а также для понимания фундаментальных процессов, происходящих в плазме, что находит применение в наземных лабораторных установках.

Цели и задачи

Данная работа направлена на изучение характеристик мелкомасштабных флуктуаций параметров плазмы в магнитослое, а именно на определение степени модификации резких фронтов плотности и модуля магнитного поля при их переходе из солнечного ветра в магнитослой, определение характерных свойств турбулентности плазмы внутри магнитослоя на ионных масштабах, а также на исследование динамики характеристик турбулентности при пересечении магнитослоя.

Научная новизна

В работе впервые на основе обширной статистики прямых измерений параметров плазмы с высоким временным разрешением исследованы характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли на масштабах, соответствующих переходу от инерционной области

турбулентного каскада к диссипативной. Впервые на основе статистики проведено сравнение характеристик турбулентности плазмы в магнитослое на различном удалении от магнитопаузы и околоземной ударной волны. С помощью статистических методов проведено сравнение характеристик турбулентности плазмы в магнитослое и солнечном ветре.

Впервые на основе сравнения двух близкорасположенных спутников перед и за околоземной ударной волной были выявлены факторы, определяющие величину коэффициента корреляции между одновременными измерениями в солнечном ветре и магнитослое. Впервые показано, что резкие фронты плотности плазмы, наблюдающиеся в различных крупномасштабных типах солнечного ветра, в разной степени подвержены модификации в магнитослое.

Научная и практическая ценность

Околоземное пространство является природной лабораторией для исследования плазмы и характеристик турбулентности плазмы. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы для понимания процессов, происходящих в лабораторной плазме, в том числе в токамаках. Полученные на основе обширного статистического материала характеристики флуктуаций плазмы на субионных масштабах представляют интерес для фундаментального исследования механизмов нагрева плазмы, в том числе для верификации разрабатываемых моделей, описывающих процессы диссипации энергии в плазме. Кроме того, статистический анализ факторов, оказывающих влияние на модификацию резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля солнечного ветра в магнитослое, представляет важность для определения влияния солнечного ветра на магнитосферу Земли, т.е. в рамках задач науки космической погоды. Полученные факторы могут быть использованы для оценки моделей распространения плазмы в магнитослое Земли и во многих других астрофизических объектах, имеющих ударную волну в набегающем потоке, а также для задач прогноза гелиогеофизической обстановки.

Методы исследования

Исследование модификации резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля при переходе из солнечного ветра в магнитослой проводилось путем сопоставления одновременных временных рядов, получаемых с космических аппаратов перед и за фронтом околоземной ударной волны. Использовались данные пары спутников миссии Themis (Angelopoulos, 2008); в ряде случаев в магнитослое использовались данные прибора БМСВ на спутнике Спектр-Р (Šafránková et al., 2013; Застенкер и др., 2013). Анализ проводился как на

основе простого сопоставления отдельных фронтов, так и с помощью корреляционного анализа одновременных измерений в солнечном ветре и магнитослое, что позволяет на основе статистики исследовать факторы, влияющие на степень модификации резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля солнечного ветра в магнитослое. Корреляционный анализ является мощным методом, используемым для сравнения временных рядов, и широко применяется в мировом научном сообществе для анализа спутниковых наблюдений (напр., Zastenker et al., 2005; Gutynska et al., 2012 и т.д.).

Анализ характеристик турбулентности параметров плазмы в магнитослое проводился на основе быстрых измерений потока ионов и направления его прихода прибором БМСВ на спутнике Спектр-Р. Временное разрешение данных этого прибора составляет 31 мс, что позволило впервые провести статистическое исследование свойств турбулентного каскада на субионных масштабах с использованием измерений плазменных параметров. Для определения характеристик турбулентности плазмы и их динамики при пересечении магнитослоя использовался Фурье-анализ, также часто применяемый в литературе при исследованиях характеристик турбулентности плазмы (см. обзоры Bruno & Carbone, 2013; Alexandrova et al., 2013). В работе использованы актуальные модели положения магнитопаузы и околоземной ударной волны, а также современные модели взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Положения, выносимые на защиту

1) Амплитуда и длительность резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля (изменений параметра более чем на 20% за время от единиц до десятков секунд) увеличивается при пересечении плазмой солнечного ветра околоземной ударной волны и распространении внутри магнитослоя. Таким образом, на околоземной ударной волне происходит дисперсия резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля и их усиление.

2) Высокое значение коэффициента корреляции (более 0.7) между одновременными измерениями плотности плазмы и модуля магнитного поля в солнечном ветре и магнитослое преимущественно наблюдается при высоких значениях модуля межпланетного магнитного поля, при расположении точки измерения в магнитослое за квазиперпендикулярной околоземной ударной волной и в периоды течения солнечного ветра, относящегося к областям сжатия перед набегающим быстрым течением. Указанные факторы необходимо учитывать для корректного анализа гелиогеофизической обстановки.

3) В магнитослое вблизи околоземной ударной волны спектры флуктуаций потока ионов на магнитогидродинамических масштабах становятся более плоскими по сравнению со спектрами,

предсказываемыми теориями развитой турбулентности (в частности, теорией Колмогорова) и наблюдаемыми в солнечном ветре, что отражает перераспределение энергии в турбулентном каскаде на указанных масштабах. При распространении плазмы вглубь магнитослоя форма спектров восстанавливается.

4) Непосредственно за околоземной ударной волной спектры флуктуаций потока ионов на кинетических масштабах описываются степенной функцией с показателем, существенно превышающим по модулю значения, предсказанные большинством существующих теорий и наблюдаемые в солнечном ветре; при распространении плазмы вглубь магнитослоя спектры приобретают вид, характерный для плазмы солнечного ветра. Отмеченное изменение спектров свидетельствует об увеличенном темпе диссипации энергии в магнитослое вблизи околоземной ударной волны.

5) В магнитослое при переходе от магнитогидродинамических масштабов к кинетическим спектры, в которых наблюдается пик, чаще обнаруживаются вблизи околоземной ударной волны, а спектры с плато на переходных масштабах наиболее часто наблюдаются вблизи магнитопаузы. Таким образом, доминирующие процессы, определяющие диссипацию энергии в плазме магнитослоя, могут зависеть от положения относительно границ - магнитопаузы и околоземной ударной волны.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты диссертационного исследования докладывались на 25 научных конференциях и семинарах, среди которых можно выделить основные:

- 9-13-я ежегодные конференции «Физика плазмы в солнечной системе», февраль 2014-2018 гг., ИКИ РАН, 3 устных доклада, 2 постера.
- 40-я Ассамблея COSPAR, Август 2014, Москва, постер.
- 26th IUGG General Assembly, Июнь 2015, Прага, Чешская Республика, устный доклад.
- AGU Chapman Conference on Dayside Magnetosphere Interactions, Chengdu, Sichuan Province, China, 10-14 July 2017, постер.
- The IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Август 2017, Кейптаун, ЮАР, устный доклад.
- EGU 2018, 8-13 апреля 2018, Вена, Австрия, постер.
- International conference Solar Wind 15, 18-22 июня 2018, Брюссель, Бельгия, постер.

Личный вклад автора

Результаты, вошедшие в диссертацию, были получены при определяющем вкладе автора под руководством научных руководителей и при содействии соавторов публикаций. Автором были отобраны и обработаны спутниковые данные, находящиеся в открытом доступе в международных базах данных, а также была проведена вторичная обработка данных российского эксперимента Плазма-Ф на космическом аппарате Спектр-Р в магнитослое. При определяющем вкладе автора был проведен анализ данных, проведена физическая интерпретация полученных результатов и решен ряд задач по исследованию характеристик турбулентности плазмы магнитослоя.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 120 страниц, включает 36 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 213 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** к диссертационной работе описано развитие существующих на данный момент представлений о магнитослое Земли. Приводится основная информация о его структуре, характеристиках плазмы и магнитного поля и показывается, как эволюционировали эти представления с момента запуска первых спутников. Также в этом разделе содержится информация об уже разработанных и разрабатываемых на данный момент моделях обтекания плазмой магнитосферы Земли, указывается на основные проблемы при разработке этих моделей. Отдельным подразделом выделены представления о свойствах турбулентности космической плазмы и обзор существующих на данный момент исследований турбулентности плазмы в магнитослое. Помимо этого, во Введении сформулированы положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит описание всех используемых в работе экспериментальных данных и методик их анализа. В разделе 1.1 приводится описание российского эксперимента Плазма-Ф на космическом аппарате Спектр-Р, его орбита в рассматриваемые периоды времени, и подробно описывается спектрометр БМСВ, данные которого используются во всех разделах диссертации. Описывается принципиальная конструкция прибора, режимы его работы, а также ограничения на использование данных прибора, в частности, в магнитослое. В разделе 1.2 приводится

информация о многоспутниковой миссии Themis: описываются состав миссии, орбиты спутников в рассматриваемый в работе период времени, а также используемые в работе данные спутников этой миссии. Информация об измерениях прочих космических аппаратов, используемых в работе, приведена в разделе 1.3.

В разделе 1.4 приводится информация о ряде существующих на данный момент моделей формы и положения магнитопаузы и околоземной ударной волны. В работе модельное положение границ используется в Главах 2 и 4 для определения положения точки измерения относительно магнитопаузы и околоземной ударной волны по методике, описанной в работе (Verigin et al., 2006).

В разделе 1.5 описываются используемые методики анализа спутниковых данных. В настоящей работе применяются две основные методики: корреляционный анализ и Фурье-анализ. Корреляционный анализ проводится для одновременно измеренных временных рядов плотности плазмы и модуля магнитного поля в солнечном ветре и магнитослое, полученных на спутниках Themis и Спектр-Р. В указанном разделе приводится пример его применения для данных двух спутников миссии Themis. Поскольку ранее в литературе было показано, что источником флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое с частотами более 0.01 Гц является околоземная ударная волна, в данной работе перед проведением корреляционного анализа к временным рядам применяется фильтр нижних частот с частотой среза 0.01 Гц. Фильтрация позволяет определять прочие факторы, влияющие на степень модификации резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля, исключив уже изученное влияние околоземной ударной волны. Фурье-анализ применяется к быстрым измерениям потока ионов и направления его прихода прибором БМСВ, и в разделе приводится пример его использования для указанных данных. Кроме того, методика автоматизированной аппроксимации Фурье-спектров, используемая далее в Главах 3 и 4, также подробно описывается в данном разделе.

Глава 2 включает в себя результаты исследования модификации резких фронтов плотности плазмы и модуля магнитного поля солнечного ветра в магнитослое. В разделе 2.1 рассматривается пример наблюдения одного и того же резкого фронта увеличения плотности плазмы перед и за околоземной ударной волной. На основе 15 событий рассматриваются изменения длительности структуры и ее амплитуды по плотности и по модулю магнитного поля при прохождении плазмы через околоземную ударную волну и распространении по магнитослою. Показано, что в 25% случаев длительность резкого фронта изменения плотности увеличивается в 2 и более раз в магнитослое по сравнению с солнечным ветром. Кроме того, в

20% случаев амплитуда фронта плотности увеличивается более чем в 1.5 раза, и в 58% случаев амплитуда фронта модуля магнитного поля увеличивается более чем в 2 раза в магнитослое.

В разделе 2.2 приводятся результаты применения корреляционного анализа к 1200 интервалам измерений плотности и модуля магнитного поля длительностью 30 минут на спутниках миссии Themis в 2008 году. Длительность интервалов выбиралась таким образом, чтобы исследовать модификацию резких фронтов, т.е. возрастаний/спадов плотности плазмы и модуля магнитного поля с длительностью порядка десятков-сотен секунд. При проведении корреляционного анализа учитывался временной сдвиг между измерениями на двух спутниках, и в дальнейшем временные ряды обозначаются как "одновременные". Показано, что среднее значение коэффициента корреляции между одновременными измерениями плотности в солнечном ветре и магнитослое составляет 0.63 ± 0.26 ; для магнитного поля это значение несколько ниже - 0.58 ± 0.26 . При этом, высокая корреляция - более 0.7 - наблюдается одновременно для двух параметров только в 21% случаев, тогда как в 36% случаев корреляция для обоих параметров не превышает 0.7.

В разделе 2.3 рассмотрено, как влияют на вероятность наблюдения высокой корреляции такие факторы, как амплитуда фронтов, характеризуемая значением относительного стандартного отклонения величины плотности или модуля магнитного поля на рассматриваемом 30-минутном интервале, угол θ_{BN} между нормалью к околоземной ударной волне и направлением межпланетного магнитного поля, а также значения плотности и скорости плазмы солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля. Показано, что высокая корреляция обоих параметров наблюдается в несколько раз чаще за квазиперпендикулярной ударной волной ($\theta_{BN} > 45^\circ$), чем за квазипараллельной ($\theta_{BN} < 45^\circ$). Помимо этого показано, что вероятность наблюдения высокой корреляции существенно возрастает при увеличении амплитуды структур, наблюдаемых на интервале, а также при увеличении плотности плазмы солнечного ветра и модуля межпланетного магнитного поля. При этом зависимости коэффициента корреляции от скорости плазмы солнечного ветра выделить не удастся.

В разделе 2.4 корреляционный анализ проводится для расширенного и дополненного набора данных. Используются как измерения двух спутников Themis в 2008 году, когда наблюдался минимум солнечной активности, так и измерения пары Themis/Спектр-Р в 2011-2014 гг., для которых характерен более высокий уровень солнечной активности. Рассматривается коэффициент корреляции величины потока ионов. В данном разделе подтверждается монотонное увеличение вероятности наблюдения высокой корреляции при увеличении модуля межпланетного магнитного поля и отмечается ограничение зависимости коэффициента корреляции от плотности плазмы солнечного ветра, которого не было видно на статистическом

материале за 2008 г.: вероятность наблюдения высокой корреляции растет при увеличении плотности вплоть до 6 см^{-3} и остается постоянной для более высоких значений плотности вплоть до 15 см^{-3} . Кроме того, в указанном разделе отмечаются зависимости степени модификации структур от типа крупномасштабного течения набегающего потока солнечного ветра, определенного по каталогу Ермолаева и др. (Ермолаев и др., 2009): наибольшему изменению подвержены структуры, наблюдающиеся в периоды медленного спокойного течения солнечного ветра, а наименьшему - в периоды регистрации областей коротящего взаимодействия (тип CIR). Показана также тенденция к зависимости значения коэффициента корреляции от положения точки измерения в магнитослое относительно его границ: высокий уровень корреляции чаще наблюдается вблизи околосземной ударной волны, чем вблизи магнитопаузы.

В **Главе 3** представлены результаты статистического исследования характеристик турбулентности плазмы в магнитослое. Исследуются спектры на масштабах, соответствующих переходу от инерционной области турбулентного каскада к диссипативной. Анализ проводится на основе ~250 часов измерений потока ионов и полярного угла прибором БМСВ в магнитослое в течение 2011-2014 гг. (полярный угол представляет собой угол между направлением потока солнечного ветра и линией Солнце-Земля). В разделе 3.1 приводятся пример измерений потока ионов и полярного угла прибором БМСВ и пример Фурье-спектров, вычисляемых для указанных данных. В разделе 3.2 представлены результаты автоматизированной обработки 671 спектра, полученного по ~20-минутным интервалам данных, и показано, что в половине случаев спектры можно аппроксимировать двумя степенными функциями с различными показателями степени (наклонами), сменяющимися друг друга на некоторой частоте, называемой критической частотой или частотой излома. Для таких событий определены средние значения наклонов спектров для частот выше и ниже критической, а также значения критической частоты, для обоих исследуемых параметров. Показано, что наклоны спектров флуктуаций потока ионов на МГД и кинетических масштабах составляют -1.8 ± 0.2 и -2.9 ± 0.3 , соответственно. Для полярного угла наклоны спектров составляют -1.7 ± 0.2 и -3.4 ± 0.6 . Наблюдается заметное различие в значениях наклонов двух величин, что характеризует различие спектров флуктуаций плотности и скорости плазмы на субионных масштабах. Показано, что частота излома также различается для двух величин: в среднем, спектры флуктуаций потока ионов имеют излом на частотах в 2 раза больших, чем спектры флуктуаций полярного угла. Аналогичная зависимость, как показано в этом разделе, справедлива и для плазмы солнечного ветра.

В разделе 3.3 приводится сопоставление полученных статистических результатов с результатами, опубликованными ранее в литературе как для плотности плазмы солнечного ветра, так и для модуля магнитного поля в магнитослое и солнечном ветре. Показано, что спектры флуктуаций потока ионов, получаемые в магнитослое, подобны спектрам флуктуаций потока ионов и плотности плазмы в солнечном ветре, а также спектрам флуктуаций модуля магнитного поля, что характеризует связь плазменных и магнитных флуктуаций на масштабах перехода от инерционной области каскада к диссипативной. Отмечается, что соотношения между наклонами и частотами излома спектров флуктуаций потока ионов и полярного угла аналогичны соотношениям, полученным в солнечном ветре для плотности и скорости плазмы. Рассмотрено отношение между частотой излома спектров флуктуаций потока ионов и частотами, определяемыми гирорадиусом протона или инерционной длиной. Полученный вид распределений свидетельствует о том, что нет возможности установить однозначную статистическую связь между частотой излома спектра и характерными плазменными масштабами, поскольку переход между масштабами определяется локальными процессами в плазме.

В разделе 3.4 на основе дополненного статистического материала анализируется форма Фурье-спектров флуктуаций потока ионов. Рассматривается 1400 спектров, полученных по ~20-минутным интервалам данных. Показано, что спектры, которые описываются двумя наклонами и изломом, наблюдаются в 52% случаев; в 19% случаев на частотах, близких к частотам излома, наблюдается широкий пик, а в 21% случаев наблюдается плато между МГД и кинетическими масштабами. В остальных 8% случаев спектры невозможно аппроксимировать степенными функциями, они представляют собой нелинейно спадающую кривую. В разделе показано, что для спектров с пиком характерна наименьшая мощность флуктуаций на МГД масштабах, а для спектров с двумя наклонами и изломом - наибольшая.

В **Главе 4** представлены результаты исследования влияния магнитопаузы и околоземной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы. В разделе 4.1 приводится анализ одного пересечения магнитослоя спутником Спектр-Р в период спокойного квазистационарного течения солнечного ветра. Анализируются мощность и наклон кинетической части спектра флуктуаций потока ионов, а также частота излома. Показано, что характеристики спектров могут изменяться при пересечении магнитослоя в отсутствии явных триггеров в солнечном ветре. Продemonстрировано, что в середине магнитослоя значение частоты излома спектра может быть близко к частоте, определяемой инерционной длиной протона или тепловым движением частиц по ларморовскому радиусу, тогда как вблизи магнитопаузы частота излома ближе к гирочастоте протона.

В разделе 4.2 представлены результаты статистического анализа влияния магнитопаузы и околоземной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы магнитослоя. Анализ проводится для 1400 интервалов измерений потока ионов длительностью ~20 минут в период 2011-2017 гг. Каждому интервалу на основе методики (Verigin et al., 2006) ставится в соответствие относительное расстояние до магнитопаузы и околоземной ударной волны, и проводится сравнение форм и характеристик частотных спектров флуктуаций потока ионов в трех выделенных областях магнитослоя: вблизи околоземной ударной волны, в середине магнитослоя и вблизи магнитопаузы. Показано, что во всех трех областях внутри магнитослоя доминируют спектры с двумя наклонами, однако вероятность наблюдения спектров с плато монотонно увеличивается при удалении от околоземной ударной волны и приближении к магнитопаузе, тогда как вероятность наблюдения спектров с пиком уменьшается. В данном разделе продемонстрировано, что вблизи околоземной ударной волны часто наблюдаются спектры, не соответствующие Колмогоровскому скейлингу на частотах, предшествующих излому; при этом на кинетических масштабах непосредственно за околоземной ударной волной спектры становятся более крутыми, с показателями, существенно большими по модулю, чем полученные ранее для всего магнитослоя в целом и чем представленные в литературе по измерениям в солнечном ветре. При этом типичная форма спектров, определенная в Главе 3, восстанавливается по мере продвижения вглубь магнитослоя, к магнитопаузе.

В **Заключении** приводится обсуждение полученных результатов и перспектив их применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом:

1) На основе анализа отдельных событий, регистрирующихся одновременно в солнечном ветре и в магнитослое двумя спутниками проекта Themis, выявлено, что фронты резких скачков (увеличения/уменьшения более чем на 20% за время от нескольких секунд до десятков секунд) плотности плазмы и модуля магнитного поля расплываются по длительности и увеличиваются по амплитуде при пересечении околоземной ударной волны и распространении в магнитослое. Амплитуда фронта плотности увеличивается, в среднем, на 30% в магнитослое по сравнению с солнечным ветром; при этом наблюдаются события с увеличением амплитуды фронта более чем в 1.5 раза. Амплитуда фронта по модулю магнитного поля увеличивается в среднем на в 2.8 раз, в отдельных событиях наблюдается увеличение амплитуды более чем в 5 раз. Длительность фронтов плотности в 25% случаев увеличивается более чем на 2 раза в магнитослое по

сравнению с солнечным ветром; в 75% случаев длительность фронта плотности увеличивается на в 1.25 раз.

2) На основе обширного набора одновременных измерений плотности плазмы и модуля магнитного поля в солнечном ветре и магнитослое был проведен корреляционный анализ между параметрами, регистрируемыми в этих двух областях. Показано, что высокое значение коэффициента корреляции (более 0.7), свидетельствующее о подобии временных рядов данных в солнечном ветре и в магнитослое, наблюдается всего в 23% случаев одновременно для плотности плазмы и модуля магнитного поля; в 36% случаев коэффициент корреляции между обоими параметрами, измеряемыми перед и за околоземной ударной волной, не превышает 0.7; в остальных случаях высокий коэффициент корреляции наблюдался только по одному из параметров. Выявлено, что вероятность наблюдения высокого значения коэффициента корреляции увеличивается при увеличении значения угла $\theta_{\text{ВН}}$ между нормалью к околоземной ударной волне и направлением межпланетного магнитного поля и при увеличении амплитуды вариаций на рассматриваемом отрезке времени. Также показано, что вероятность наблюдения высокого значения коэффициента корреляции увеличивается монотонно при увеличении модуля межпланетного магнитного поля, а также увеличивается при возрастании плотности плазмы солнечного ветра до 9 см^{-3} и далее не изменяется вплоть до значений порядка 15 см^{-3} . Из результатов работы следует, что для различных типов крупномасштабного течения плазмы солнечного ветра, классифицируемых согласно каталогу Ермолаева и др. (Ермолаев и др., 2009), характерны различные значения коэффициента корреляции между одновременными измерениями потока ионов в солнечном ветре и магнитослое. Так, если перед околоземной ударной волной наблюдается медленное невозмущенное течение солнечного ветра, значение коэффициента корреляции выше 0.7 наблюдаются всего в 30% случаев, тогда как для типа течения CIR, которым обусловлено ~20% магнитных бурь с $\text{Dst} < -50 \text{ нТл}$ (Yermolaev et al., 2010, 2012), вероятность наблюдения высокой корреляции максимальна и составляет 60%. Для течения солнечного ветра типа Ejecta, которым вызвано 35% магнитных бурь, вероятность наблюдения высокой корреляции составляет 40%. Этот результат необходимо учитывать для разработки и апробации моделей связи вариаций параметров солнечного ветра и магнитосферными возмущениями.

3) Впервые на основе обширного статистического материала определены характеристики турбулентности параметров плазмы в магнитослое на масштабах, соответствующих переходу от инерционной области турбулентного каскада к диссипативной, т.е. 0.1-100 с (0.01-10 Гц). Показано, что типичная форма частотных спектров, характеризующаяся двумя наклонами и изломом, наблюдается только в ~52% случаев в магнитослое; в 21% случаев в спектрах

наблюдается широкий пик вместо излома, а в 19% случаев перед изломом существует плато; в 8% случаев аппроксимация степенными функциями не применима. При этом показано, что спектры с пиком наблюдаются преимущественно вблизи околоземной ударной волны, тогда как спектры с плато чаще наблюдаются вблизи магнитопаузы, что свидетельствует об особенностях механизмов формирования турбулентного каскада в различных областях внутри магнитослоя.

4) Впервые на основе статистического анализа показано, что в магнитослое вблизи околоземной ударной волны спектры флуктуаций потока ионов на магнитогидродинамических масштабах описываются функцией, отличной от степенной функции с показателем $-5/3$, характерной для теории Колмогорова. При этом в остальной части магнитослоя и в солнечном ветре на указанных масштабах, как правило, наблюдаются спектры с показателем степени, близким к $-5/3$. Таким образом, наблюдается нарушение вида турбулентного каскада, характерного для турбулентности солнечного ветра, на околоземной ударной волне, вызванное поступлением дополнительной энергии в каскад. При дальнейшем распространении плазмы по магнитослою спектры приобретают вид, характерный для развитой турбулентности.

5) На кинетических масштабах в магнитослое, в среднем, спектры флуктуаций потока ионов описываются степенной функцией с показателем -2.9 ± 0.2 , что соответствует средним значениям, представленным в литературе для магнитного поля. При этом непосредственно за околоземной ударной волной показатель спектров значительно выше по модулю, чем в остальной части магнитослоя. Полученные значения показателей степени отличаются от показателей, характерных для флуктуаций магнитного поля и предсказываемых в теориях турбулентности. Отмеченная особенность формы спектра вблизи околоземной ударной волны свидетельствует о наличии дисбаланса энергии в каскаде, вызванного увеличенным темпом диссипации в этой области.

6) Показано, что значение частоты, на которой происходит переход между МГД и кинетическими масштабами в магнитослое, для спектров флуктуаций потока ионов в среднем соответствует частотам, определяемым инерционной длиной протона и гирорадиусом протона. Однако, ширина распределений свидетельствует о том, что процессы перехода между масштабами, т.е. процессы диссипации энергии, определяются локальными факторами.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Результаты диссертационной работы были опубликованы в 18 статьях, 10 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК и учитываются в системах цитирования РИНЦ, Web of Science и Scopus.

1. L. S. Rakhmanova, M. O. Riazantseva, G. N. Zastenker, J. Safrankova, Modification of small- and middle-scale solar wind structures by the bow shock and magnetosheath: Correlation analysis, *Planet. Space. Sci.*, 115, pp. 12-18, 2015.
2. Л.С. Рахманова, М.О. Рязанцева, Г.Н. Застенкер, Прохождение структур солнечного ветра через магнитослой по данным двух космических аппаратов THEMIS, *Космические исследования*, Т. 53 № 5, С. 363-373, 2015.
3. Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Correlation level between solar wind and magnetosheath plasma and magnetic field parameters, *Adv. Space Res.*, 58 (2), 157-165, 2016.
4. M.O. Riazantseva, V.P. Budaev, L.S. Rakhmanova, G.N. Zastenker, J. Safrankova, Z. Nemecek, L. Prech, Comparison of properties of small-scale ion flux fluctuations in flank magnetosheath and in solar wind, *Adv. Space Res.*, 58 (2), 166-174, 2016.
5. Rakhmanova, L., Riazantseva, M. & Zastenker, G., Plasma fluctuations at the flanks of the Earth's magnetosheath at ion kinetic scales, *Ann. Geophys.* 34, 1011–1018, 2016.
6. М. О. Рязанцева, Л. С. Рахманова, Г. Н. Застенкер, Ю. И. Ермолаев, Типы спектров флуктуаций потока ионов в солнечном ветре и магнитослое на стыке инерционного и диссипативного интервалов, *Геомагнетизм и Аэрономия*, Т. 57 , №1, СС. 3-7, 2017.
7. Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. and Yu.I. Yermolaev, High-frequency plasma fluctuations in the middle magnetosheath and near its boundaries: Spektr-R observations, *J. Plasma Phys.*, V.83, 705830204, 2017.
8. Рахманова Л.С., М.О. Рязанцева, Г.Н. Застенкер, М.И. Веригин, Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, Влияние параметров межпланетной среды и границ магнитослоя на величину коэффициента корреляции между потоком ионов в солнечном ветре и магнитослое, *Геомагнетизм и Аэрономия*, Т 58 № 4 С 463-470, 2018.
9. L. Rakhmanova, M. Riazantseva, G. Zastenker, M. Verigin, Kinetic-scale ion flux fluctuations behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123, 2018.
10. Л.С. Рахманова, М.О. Рязанцева, Г.Н. Застенкер, М.И. Веригин, Влияние магнитопаузы и головной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли, *Геомагнетизм и Аэрономия*, 58, № 6, с. 749–758, 2018.

Список публикаций автора в трудах конференций:

1. Rakhmanova L.S., Riazantseva M.O., Zastenker G.N. Dynamics of the Small-scale Solar Wind Structures with Sharp Boundaries under Transfer from Solar Wind to Magnetosheath, WDS'12

- Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague, Matfyzpress, pp. 176-181, 2012.
2. Rakhmanova L.S., Riazantseva M.O., Zastenker G.N. Small- and Middle-scale Solar Wind Structures, Transferring from Solar Wind to the Magnetosheath: Correlation Analysis, WDS'13 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague, Matfyzpress, pp. 30-36, 2013.
 3. Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Корреляционный анализ мелко- и средне-масштабных структур по одновременным наблюдениям в солнечном ветре и магнитослое, Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике, Сборник трудов XIII-ой Конференции молодых ученых "Взаимодействие полей и излучения с веществом", Секция В. Физика околоземного космического пространства. БШФФ-2013. С. 206–208, 2013.
 4. Rakhmanova L., Zastenker G., Riazantseva M. Modification of Small-scale Solar Wind Plasma Structures in the Subsolar Regions and Flank of the Magnetosheath, WDS'14 Proceedings of Contributed Papers: Part II – Physics of Plasmas and Ionized Media (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague, Matfyzpress, 2014, pp. 325–330
 5. Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Correlation analysis of simultaneous solar wind and magnetosheath measurements at different locations of near-Earth space, Proceedings of the 10th International Conference “Problems of Geocosmos”. – SPb., 2014, ISBN: 978-5-9651-0878-7, Editors: V. N. Troyan et al., p. 366-371.
 6. Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Сопоставление одновременных измерений плазмы и магнитного поля в солнечном ветре и магнитослое на различных расстояниях от магнитопаузы, Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, pp. 99-102, 2015 (Kola Science Centre, Russian Academy of Science, 2015)
 7. L. Rakhmanova, M. Riazantseva, G. Zastenker, Evolution of rapid fluctuations of the plasma parameters during the crossing of the Earth's magnetosheath, Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXIX Annual Seminar, Apatity (Kola Science Centre, Russian Academy of Science (ISBN 978-5-91137-338-2)), pp. 66-69, 2016
 8. L. Rakhmanova, M. Riazantseva, N. Borodkova, O. Sapunova, G. Zastenker, Properties of the magnetosheath plasma turbulence upstream and downstream interplanetary shocks, Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XL Annual Seminar, Apatity (Kola Science Centre, Russian Academy of Science), pp. 82-85, 2017.

Список цитируемой литературы

- Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. (2009) Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. *Космические Исследования*, 47(2), 99–113.
- Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. (2013) Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ. *Космические исследования*, 51(2), 88–99.
- Николаева Н.С., Застенкер Г.Н., Шафранкова Я. и др. (1998) Об источниках и амплитуде движения магнитопаузы. *Космические исследования*. 36, 576–588.
- Петрукович, А.А., Мерзлый, А.М., Хабибулин С.Ю. (2016) *Практические аспекты гелиогеофизики*, ИКИ РАН, Москва, 2016.
- Alexandrova, O., Mangeney, A., Maksimovic, M., Cornilleau-Wehrlin, N., Bosqued, J.-M., & André, M. (2006). Alfvén vortex filaments observed in magnetosheath downstream of a quasi-perpendicular bow shock. *Journal of Geophysical Research*, 111(A12), A12208. <https://doi.org/10.1029/2006JA011934>
- Angelopoulos, V. (2008). The THEMIS Mission. *Space Science Reviews*, 141(1–4), 5–34. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1>
- Borodkova, N. L., Zastenker, G. N., & Sibeck, D. G. (1995). A case and statistical study of transient magnetic field events at geosynchronous orbit and their solar wind origin. *Journal of Geophysical Research*, 100(A4), 5643–5656. <https://doi.org/10.1029/94JA03144>
- Bruno, R., & Carbone, V. (2013). The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2>
- Erickson, G., Siscoe, G., Weimer, D., Siebert, K., Heinemann, M., Sonnerup, B. U., et al. (2002). Prediction of Alfvénic turbulence near the magnetospheric sash. *Planetary and Space Science*, 50(5–6), 627–632. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00042-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00042-9)
- Gutynska, O., Šimůnek, J., Šafránková, J., Němeček, Z., & Přech, L. (2012). Multipoint study of magnetosheath magnetic field fluctuations and their relation to the foreshock. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 117(A4). <https://doi.org/10.1029/2011JA017240>
- Hayosh, M., Šafránková, J., & Němeček, Z. (2006). MHD-modelling of the magnetosheath ion plasma flow and magnetic field and their comparison with experiments. *Advances in Space Research*, 37(3), 507–514. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.059>
- Huang, S. Y., Sahraoui, F., Deng, X. H., He, J. S., Yuan, Z. G., Zhou, M., et al. (2014). Kinetic turbulence in the terrestrial magnetosheath: Cluster observations. *The Astrophysical Journal*, 789(2), L28. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/789/2/L28>
- Huang, S. Y., Hadid, L. Z., Sahraoui, F., Yuan, Z. G., & Deng, X. H. (2017). On the Existence of the Kolmogorov Inertial Range in the Terrestrial Magnetosheath Turbulence. *The Astrophysical Journal Letters*, 836(1), L10. Retrieved from <http://stacks.iop.org/2041-8205/836/i=1/a=L10>
- Kartalev, M. D., Nikolova, V. I., Kamenetsky, V. F., & Mastikov, I. P. (1996). On the self-consistent determination of dayside magnetopause shape and position. *Planetary and Space Science*, 44(10), 1195–1208. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(96\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(96)00040-2)
- Lacombe, C., Steinberg, J.-L., Harvey, C. C., Hubert, D., Mangeney, A., & Moncuquet, M. (1997). Density fluctuations measured by ISEE 1-2 in the Earth's magnetosheath and the resultant scattering of radio waves. *Annales Geophysicae*, 15(4), 387–396. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0387-5>
- Lacombe, C., Samsonov, A. A., Mangeney, A., Maksimovic, M., Cornilleau-Wehrlin, N., Harvey, C. C., et al. (2006). Cluster observations in the magnetosheath, Part 2: Intensity of the turbulence at electron scales. *Annales Geophysicae*, 24(12), 3523–3531. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-3523-2006>
- Mangeney, A., Lacombe, C., Maksimovic, M., Samsonov, A. A., Cornilleau-Wehrlin, N., Harvey, C. C., et al. (2006). Cluster observations in the magnetosheath – Part 1: Anisotropies of the wave vector distribution of the turbulence at electron scales. *Annales Geophysicae*, 24(12), 3507–3521. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-3507-2006>
- Němeček, Z., Šafránková, J., Zastenker, G. N., Pišoft, P., Paularena, K. I., & Richardson, J. D. (2000). Observations of the radial magnetosheath profile and a comparison with gasdynamic model predictions. *Geophysical Research Letters*, 27(17), 2801–2804. <https://doi.org/10.1029/2000GL000063>
- Němeček, Z., Šafránková, J., Zastenker, G. N., Pišoft, P., Paularena, K. I. (2002) Spatial distribution of the magnetosheath ion flux, *Advances in Space Research*, 30(12), 2751–2756.

- Pulinets, M. S., Antonova, E. E., Riazantseva, M. O., Znatkova, S. S., & Kirpichev, I. P. (2014). Comparison of the magnetic field before the subsolar magnetopause with the magnetic field in the solar wind before the bow shock. *Advances in Space Research*, 54(4), 604–616. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.023>
- Retinò, A., Sundkvist, D., Vaivads, A., Mozer, F., André, M., & Owen, C. J. (2007). In situ evidence of magnetic reconnection in turbulent plasma. *Nature Physics*, 3(4), 235–238. <https://doi.org/10.1038/nphys574>
- Šafránková, J., Hayosh, M., Gutynska, O., Němeček, Z., & Přech, L. (2009). Reliability of prediction of the magnetosheath B_z component from interplanetary magnetic field observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114(A12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009JA014552>
- Šafránková, J., Němeček, Z., Přech, L., Zastenker, G., Čermák, I., Chesalin, L., et al. (2013). Fast Solar Wind Monitor (BMSW): Description and First Results. *Space Science Reviews*, 175(1–4), 165–182. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
- Šafránková, J., Němeček, Z., Němec, F., Přech, L., Chen, C. H. K., & Zastenker, G. N. (2016). Power spectral density of fluctuations of bulk and thermal speeds in the solar wind. *The Astrophysical Journal*, 825(2), 121. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/121>
- Sahraoui, F., Belmont, G., Rezeau, L., Cornilleau-Wehrlin, N., Pinçon, J. L., & Balogh, A. (2006). Anisotropic Turbulent Spectra in the Terrestrial Magnetosheath as Seen by the Cluster Spacecraft. *Physical Review Letters*, 96(7), 075002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.075002>
- Samsonov, A. A., Pudovkin, M. I., Gary, S. P., & Hubert, D. (2001). Anisotropic MHD model of the dayside magnetosheath downstream of the oblique bow shock. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A10), 21689–21699. <https://doi.org/10.1029/2000JA900150>
- Schwartz, S. J., Burgess, D., & Moses, J. J. (1996). Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: present status. *Annales Geophysicae*, 14(11), 1134–1150. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z>
- Sergeev, V., Stepanov, N., Ogawa, Y., Kāki, S., & Kauristie, K. (2018). Solar wind dependence of electric conductances and currents in the auroral zone. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 177, 38–45. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2017.07.006>
- Sergeev, V. A., Dmitrieva, N. P., Stepanov, N. A., Sormakov, D. A., Angelopoulos, V., & Runov, A. V. (2015). On the plasma sheet dependence on solar wind and substorms and its role in magnetosphere-ionosphere coupling. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 133. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0296-x>
- Shevyrev, N. N., & Zastenker, G. N. (2005). Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks. *Planetary and Space Science*, 53(1–3), 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
- Shevyrev, N. N., Zastenker, G. N., Nozdachev, M. N., Němeček, Z., Šafránková, J., & Richardson, J. D. (2003). High and low frequency large amplitude variations of plasma and magnetic field in the magnetosheath: Radial profile and some features. *Advances in Space Research*, 31(5), 1389–1394. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00008-5)
- Sibeck, D. G., & Gosling, J. T. (1996). Magnetosheath density fluctuations and magnetopause motion. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 101(A1), 31–40. <https://doi.org/10.1029/95JA03141>
- Spreiter, J. R., & Stahara, S. S. (1980). A new predictive model for determining solar wind-terrestrial planet interactions. *Journal of Geophysical Research*, 85, 6769–6777. <https://doi.org/10.1029/JA085iA12p06769>
- Tóth, G., Sokolov, I. V., Gombosi, T. I., Chesney, D. R., Clauer, C. R., De Zeeuw, D. L., et al. (2005). Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A12). <https://doi.org/10.1029/2005JA011126>
- Verigin, M. I., Tóth, G., Erdős, G., & Kotova, G. A. (2006). Magnetosheath – Interplanetary medium reference frame: Application for a statistical study of mirror type waves in the terrestrial plasma environment. *Advances in Space Research*, 37(3), 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.042>
- Yagova, N., Pilipenko, V., Watermann, J., & Yumoto, K. (2007). Control of high latitude geomagnetic fluctuations by interplanetary parameters: The role of suprathermal ions. *Annales Geophysicae*. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-1037-2007>
- Yermolaev, Y. I., Nikolaeva, N. S., Lodkina, I. G., & Yermolaev, M. Y. (2012). Geoeffectiveness and efficiency of CIR, Sheath and ICME in generation of magnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 117(A00L07). <https://doi.org/10.1029/2011JA017139>
- Yermolaev, Y. I., Lodkina, I. G., Nikolaeva, N. S., & Yermolaev, M. Y. (2015). Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(9),

7094–7106. <https://doi.org/10.1002/2015JA021274>

- Zastenker, G.N. (2004). An overview of new concepts deduced from Interball solar wind investigations. *Multiscale Processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball to Cluster* (eds. J.-A. Sauvaud and Z. Nemecek, Netherlands, 37-56.
- Zastenker, G. N., Nozdrachev, M. N., Němeček, Z., Šafránková, J., Paularena, K. I., Richardson, J. D., et al. (2002). Multispacecraft measurements of plasma and magnetic field variations in the magnetosheath: Comparison with Spreiter models and motion of the structures. *Planetary and Space Science*, 50(5–6), 601–612. [https://doi.org/10.1016/S0032-0633\(02\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0032-0633(02)00039-9)
- Zolotukhina, N., Pilipenko, V., Engebretson, M. J., & Rodger, A. S. (2007). Response of the inner and outer magnetosphere to solar wind density fluctuations during the recovery phase of a moderate magnetic storm. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.011>