

16-05-00470

Семенов Владимир Семенович

Нарушение симметрии как драйвер магнитосферной динамики

А Конкурс проектов фундаментальных научных исследований

2017

Аннотация

В 2017 г. было проведено исследование того, какие параметры солнечного ветра или их комбинации ответственны за изгиб токового слоя в хвосте магнитосферы, как эти параметры влияют на число возникающих магнитосферных суббурь, а также какие структуры солнечного ветра способны их переносить. Исследование проводилось на основе баз данных о началах суббурь [Frey et al.] (4700 событий pf 2000-2005 гг.) и SUPERMAG (18800 событий за 2000-2010гг.) и по данным OMNI о параметрах солнечного ветра.

Статистическое исследование за 11 летний солнечный цикл показало, что 66% времени (в годы максимума активности - 75%, в годы минимума - 60%) в солнечном ветре знаки произведения ($VzVx$) и Vz совпадают. Это означает, что Vz компонента ММП вместе с комбинацией параметров ($VzVx$), определяющих асимметрию магнитосферы, переносится в основном распространяющимися от Солнца альфвеновскими волнами. Мы показали, что распределение ($VzVx$) обладает весьма заметной асимметрией и в момент начала суббури. Для $Vz < 0$ суббури случаются почти в два раза (точнее в 1.75 раза) чаще при $(VzVx) < 0$, чем при положительном значении произведения ($VzVx$). Это различие нарастает перед началом суббури, медленно в начале предварительной фазы, а в последние 10-15 минут перед взрывом весьма резко.

Поскольку выяснилось, что геоэффективная Vz компонента ММП и произведение ($VzVx$) переносится солнечным ветром (альфвеновскими волнами), то появилась необходимость в моделировании солнечного ветра. С этой целью разработанный в Финском Метеорологическом Институте (FMI) гибридный код, записанный в сферических координатах, был модифицирован для моделирования простейшего случая радиального распространения солнечного ветра. Результаты моделирования оказались в замечательном согласии с классической теорией солнечного ветра Паркера, но с важным отличием. Роль градиента давления, играющего основную роль в ускорении ветра у Паркера, взяло на себя электрическое поле. Были также рассчитаны эффективные показатели политропы протонного газа, которые оказались близкими к единице.

В 2017 году было проведено исследование энерговыделения в процессе импульсного магнитного пересоединения. Показано, что на медленных ударных волнах плазма ускоряется до альфвеновской скорости, сжимается (максимальное сжатие 2.5) и нагревается. Над ускоренными потоками образуется область усиленного магнитного поля и нагретого газа, известной как TCR (traveling compression region). Суммарная энергия в этой области может значительно превышать энергию ускоренных потоков. В следе за разлетающимися ускоренными потоками остается область с пониженной интенсивностью магнитного поля и пониженной температурой, именно отсюда в основном и черпается энергия, необходимая для ускоренной и нагретой плазмы, а также для области TCR.

По результатам проекта опубликовано две статьи в JGR и еще одна послана в GRL.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Объявленные ранее цели Проекта на 2017 год

1. Статистические распределения по числу суббурь для возмущений солнечного ветра альфвеновского типа с использованием дополненных баз данных ([Frey et al., Partamies et al., Tanskanen et al.]). Ожидается, что бегущие от Солнца альфвеновские волны в основном относятся к числу несимметричных параметров и они окажутся более эффективными при формировании неустойчивости срыва суббури, чем симметричные параметры.
 2. Исследование изгибного слоя на устойчивость, численное моделирование роста неустойчивостей и распространения волн в асимметричном токовом слое.
 3. Детальное исследование роли Vx компоненты межпланетного магнитного поля как несимметричного параметра, стимулирующего срыв суббури.
 4. Исследование энерговыделения (преобразования магнитной энергии в кинетическую и внутреннюю энергию плазмы) в процессе пересоединения магнитных силовых линий в симметричных и несимметричных конфигурациях.
- Ожидается публикация двух статей в реферируемых журналах в 2017 году.

Полученные в 2017 году важнейшие результаты

2017 г. по базе данных SUPERMAG (18800 событий) и данным OMNI по параметрам солнечного ветра было проведено специальное исследование для ответа на вопрос какие параметры солнечного ветра или их комбинации ответственны за изгиб токового слоя в хвосте магнитосферы, какие структуры солнечного ветра способны их переносить и как они влияют на число возникающих магнитосферных суббурь.

В предыдущем 2016 году было показано, что кроме Vz-компоненты скорости солнечного ветра, важное значение имеет также величина и направление Vx-компоненты межпланетного магнитного поля, которая также может увеличивать степень отклонения плазменного слоя от плоскости экватора и способствовать изгибу токового слоя. Поэтому естественно предположить, что кумулятивный эффект этих двух факторов (то есть произведение $(VzVx)$) будет приводить к усилению несимметричности общей конфигурации магнитосферы.

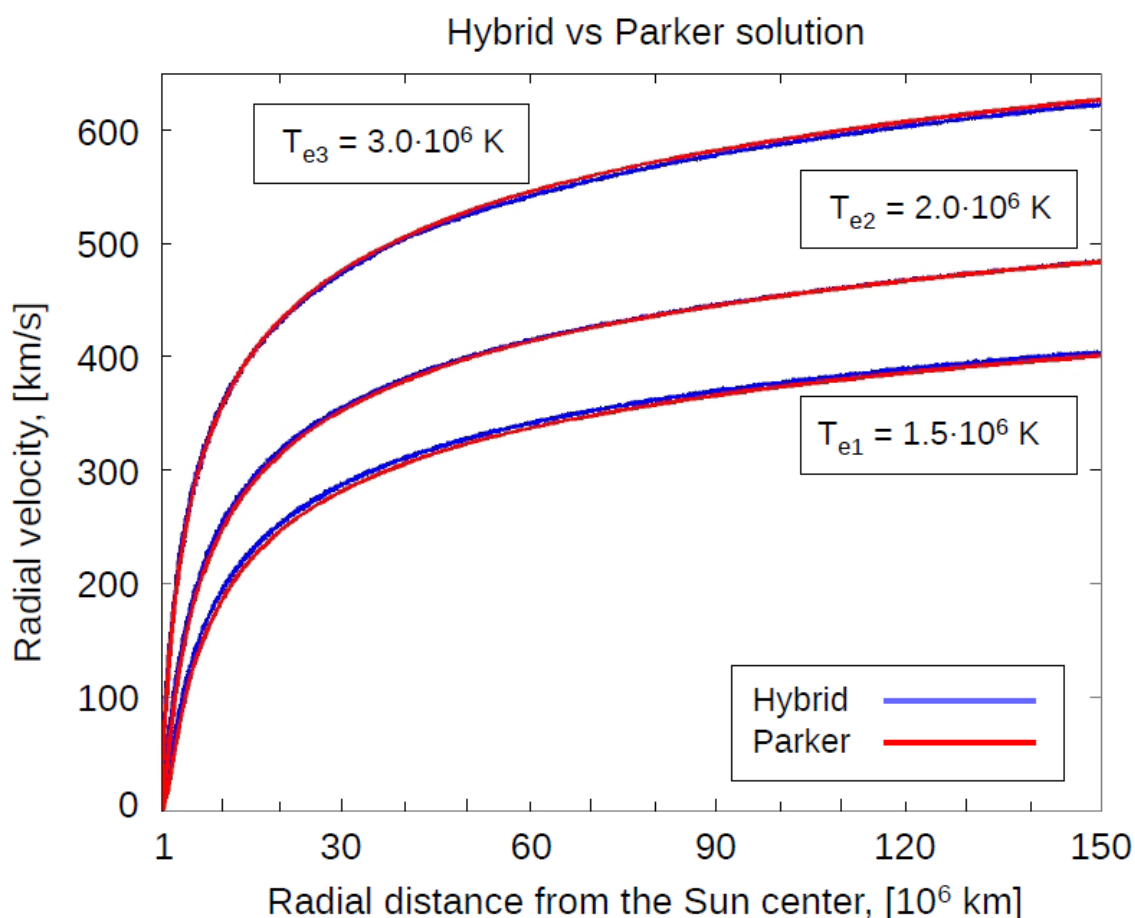
В проведенном в этом году исследовании удалось показать, что совпадение знаков произведения $(VzVx)$ и Vz соответствует распространяющимся от Солнца альфвеновским волнам, если же знаки $(VzVx)$ и Vz разные то это признак того, что альфвеновские волны распространяются к Солнцу. В частности, альфвеновские волны, переносящие от Солнца геоэффективную $Bz < 0$ автоматически переносят также и комбинацию $(VzVx) < 0$, которая способствует изгибу токового слоя в хвосте и тем самым делает конфигурацию магнитосферы максимально несимметричной.

Согласно полученным результатам статистическое распределение $(VzVx)$ обладает весьма заметной асимметрией в момент начала суббури. Для $Bz < 0$ суббури случаются почти в два раза (точнее в 1.75 раза) чаще для $(VzVx) < 0$, чем для положительного произведения $(VzVx) > 0$. Аналогичные результаты верны и для $Bz > 0$. Это различие нарастает перед началом суббури, за 40 мин медленно, а в последние 10-15 мин весьма резко.

Статистическое исследование за 11 летний солнечный цикл показало, что 66% времени знаки ($V_z V_x$) и V_z совпадают, причем в годы максимума активности это время увеличивается до 75%, а в годы минимума слегка уменьшается до 60%. Это означает, что V_z компонента ММП вместе с комбинацией параметров ($V_z V_x$), определяющих асимметрию магнитосферы, переносится почти исключительно распространяющимися от Солнца альфвеновскими волнами.

По этим результатам подготовлена и послана в печать статья. Marina Kubyshkina, Vladimir Semenov, Nikolai Erkaev, Evgeny Gordeev, Stepan Dubyagin, Natalia Ganushkina, and Maria Shukhtina, Relations between v_z and B_x components in solar wind and their effect on substorm onset, GRL, submitted.

Поскольку выяснилось, что геоэффективная V_z компонента ММП переносится солнечным ветром (альфвеновскими волнами) вместе с комбинацией параметров ($V_z V_x$), определяющих асимметрию магнитосферы, то появилась необходимость в моделировании солнечного ветра. С этой целью разработанный в Финском Метеорологическом Институте (FMI) гибридный код, записанный в сферических координатах, был модифицирован для моделирования простейшего случая радиального распространения солнечного ветра. Результаты моделирования оказались в замечательном согласии с классической теорией солнечного ветра Паркера, но с важным отличием. Роль градиента давления, играющего основную роль в ускорении ветра у Паркера, взяло на себя электрическое поле. Были также рассчитаны эффективные показатели политропы протонного газа, которые оказались близкими к единице.

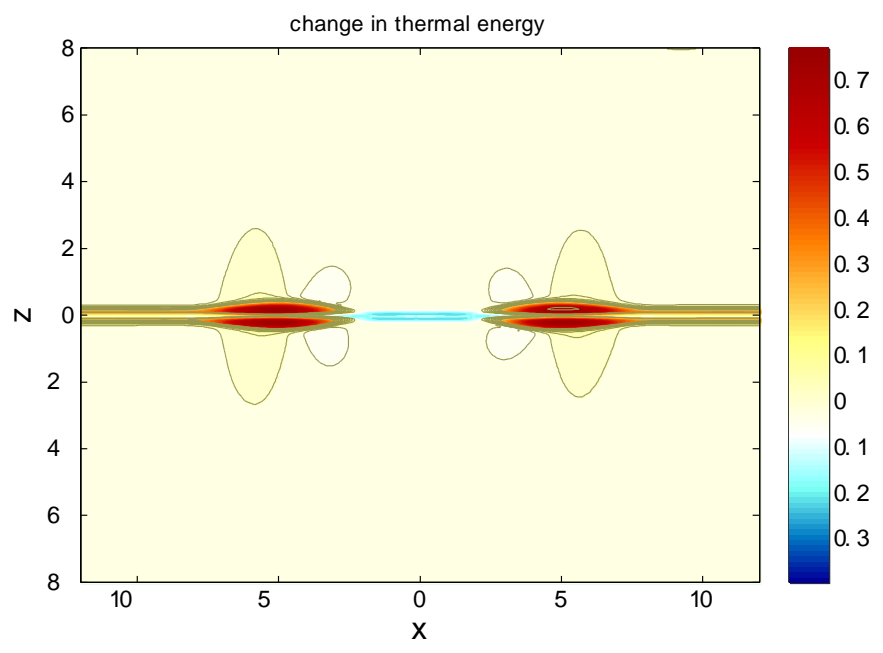
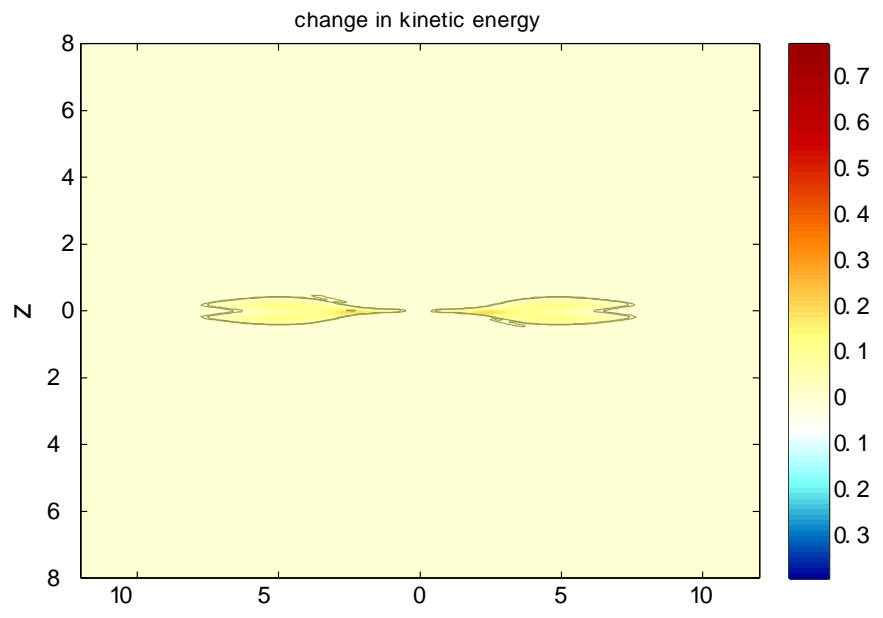
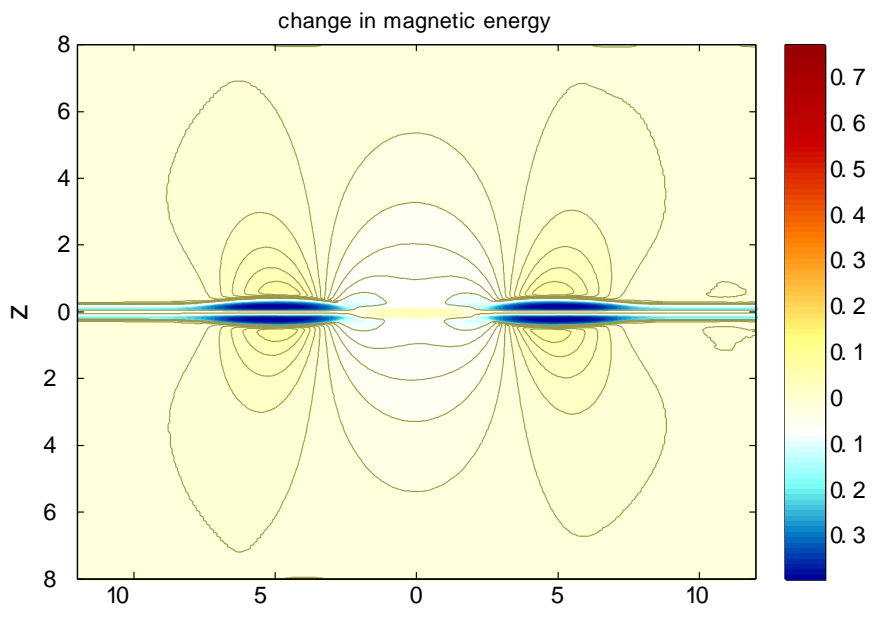


По материалам моделирования опубликована статья Dyadechkin, S., V. S. Semenov, E. Kallio, N. V. Erkaev, M. Alho, and H. Lammer, Global kinetic hybrid simulation for radially expanding solar wind, *J. Geophys. Res. Space Physics*, Vol.122, 7854–7864, doi:10.1002/2017JA023992, 2017

В 2017 году были продолжены теоретические исследования устойчивости токовых слоев. Одна из очень серьезных проблем состоит в следующем. Область изгиба токового слоя (и потенциальной неустойчивости) составляет около $10 R_e$, а гораздо более протяженная часть остается симметричной и, скорее всего, устойчивой. Будет ли весь слой устойчивым или нет оставалось неясным, при этом задача об устойчивости существенно трехмерная, определение устойчивости по одномерным сечениям мало что дает. Для решения этой проблемы был реализован численный метод. МГД уравнения линеаризовались по фону, выбиралось возмущение вида $\sim \exp(-iky)$ и полученная таким образом линеаризованная МГД система для данного волнового числа k решалась численно и находился инкремент неустойчивости. Для начала был выбран токовый слой, у которого центральная часть была устойчива (по одномерному расчету), а края неустойчивы. Численный трехмерный анализ показал, что для сколь угодно малых областей неустойчивости по краям весь слой тоже был неустойчивым. При этом инкремент неустойчивости оказался пропорциональным отношению неустойчивой зоны к общей длине слоя. По материалам работы готовится статья.

В 2017 году было проведено исследование энерговыделения в процессе импульсного пересоединения магнитных силовых линий. Показано, что на медленных ударных волнах плазма ускоряется до альфвеновской скорости, сжимается (максимальное сжатие 2.5) и нагревается. Над ускоренными потоками образуется область усиленного магнитного поля и нагретого газа, известной как TCR (traveling compression region). Суммарная энергия в этой области может значительно превышать энергию ускоренных потоков. В следе за разлетающимися ускоренными потоками остается область с пониженной интенсивностью магнитного поля и пониженной температурой, именно отсюда в основном и черпается энергия, необходимая для ускоренной и нагретой плазмы, а также для области TCR.

На представленном ниже рисунке показано изменение различных видов энергии в процессе магнитного пересоединения.



По материалам работы опубликована статья Kiehas, S.A., N.N. Volkonskaya, V.S. Semenov, N.V. Erkaev, I.V. Kubyshkin, I.V. Zaitsev, Large-scale energy budget of impulsive magnetic reconnection: Theory and simulation, J. Geophys. Res. Space Physics, Vol.122, 3212–3231, doi:10.1002/2016JA023169, 2017

Все полученные результаты соответствуют мировому уровню

Методы и подходы

Статистическое исследование суббулевой активности с целью выявления влияния параметров солнечного ветра, влияющих на создание изгиба магнитосферного токового слоя и несимметрию магнитосферной конфигурации,

было выполнено посредством сопоставления имеющихся базы данных по суббулевой активности SUPERMAG (18800 событий) с данными OMNI по солнечному ветру с использованием новаторского метода сопоставления знаков произведения ($VzBx$) и Bz , что позволило разделить возмущения солнечного ветра на приходящие от Солнца и уходящие к Солнцу, а также выявить зависимость суббулевой активности от произведения ($VzBx$), определяющего степень асимметрии магнитосферной конфигурации.

Для решения проблемы устойчивости токовых слоев был реализован численный метод. МГД уравнения линеаризовались по фону, выбиралось возмущение вида $\sim \exp(-iky)$ и полученная таким образом линеаризованная МГД система для данного волнового числа k решалась численно, по результатам находился инкремент неустойчивости.

Вклад каждого члена коллектива в выполнение Проекта в 2016 году

- В.С.Семенов Общее руководство проектом, исследование устойчивости токовых слое, моделирование солнечного ветра и изучения энергетического баланса в процессе магнитного пересоединения.
- М.В.Кубышкина Исследование влияние конфигурационных свойств магнитосферы и солнечного ветра на срыв магнитосферной суббури
- И.В.Зайцев. Изучения энергетического баланса в процессе импульсного магнитного пересоединения и формирование медленных ударных волн.
- Е.И.Гордеев Исследование роли Vx компоненты межпланетного магнитного поля и произведения ($VzBx$) в создании несимметричных конфигураций магнитосферы.

Участие в 2016 году в научных мероприятиях по тематике Проекта

40-й ежегодный семинар "Физика авроральных явлений" (Апатиты, ПГИ, 2017 г.)

I.V.Zaitsev, Slow Shock formation in magnetic reconnection. PIC simulation and anisotropic MHD,- устный доклад

Финансовые средства, полученные в 2016 году от Фонда

500000 руб.

Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных и посланных в печать в 2016 году

Marina Kubyshkina, Vladimir Semenov, Nikolai Erkaev, Evgeny Gordeev, Stepan Dubyagin, Natalia Ganushkina, and Maria Shukhtina, Relations between vz and Bx components in solar wind and their effect on substorm onset, GRL, submitted.

Dyadechkin, S., **V. S. Semenov**, E. Kallio, N. V. Erkaev, M. Alho, and H. Lammer, Global kinetic hybrid simulation for radially expanding solar wind, *J. Geophys. Res. Space Physics*, Vol.122, 7854–7864, doi:10.1002/2017JA023992, 2017

Kiehas, S.A., N.N. Volkonskaya, **V.S. Semenov**, N.V. Erkaev, I.V. Kubyshkin, **I.V. Zaitsev**, Large-scale energy budget of impulsive magnetic reconnection: Theory and simulation, *J. Geophys. Res. Space Physics*, Vol.122, 3212–3231, doi:10.1002/2016JA023169, 2017

Ответ редактора GRL по статье М.В.Кубышкиной

От Кого:	<grlonline@agu.org>
Тема:	2017GL076268 (Editor - Merav Opher): Decision Letter
Дата:	Wed, 20 Dec 2017 15:00:08 -0500
Кому:	<m.kubyshkina@spbu.ru>

Dear Dr. Kubyshkina:

Thank you for submitting your manuscript entitled "Relations between vz and Bx components in solar wind and their effect on substorm onset" [Paper #2017GL076268] to Geophysical Research Letters. I have now received 1 reviews of your manuscript, which are included below and/or attached.

Based on the review comments, your manuscript may be suitable for publication after minor revisions.

The feedback provided in the reviewer assessments of your manuscript is important and should be taken into account as you complete your revision. I encourage you to submit a suitably revised version of your manuscript by January 3, 2018.

Upon submission, we will need to receive the following:

1. A response to reviewer file that lists each of the comments and describes how the manuscript has/has not been modified in response to those comments.
2. A copy of the manuscript with the changes noted (e.g., highlighted, "track changes," italics or bold changes). Please upload the article with tracked/highlighted changes as a response to reviewer file.
3. A copy of the revised manuscript with the changes incorporated which will be used for publication if the manuscript is accepted.
4. In addition to addressing the remaining important technical issues raised by reviewers, please also ensure that AGU data policy is addressed in the Acknowledgements section and that the key points report what is learned from the study.
5. All files in publication-ready formats.

***Publication-ready formats for article files are limited to Word and LaTeX (Excel is also acceptable for tables only). Figure files must be individually uploaded as .eps, .tif, .jpg, or .pdf files and all parts of the same figure need to be combined in one file.

6. AGU has officially joined with many other publishers in a [commitment](#) to include the [ORCID](#) (Open Researcher and Contributor ID) for authors of all papers published starting in 2016. Funding agencies are also asking for ORCID's.

Including the ORCID as part of published author information in papers will better enable linking of content and accurate discovery across individuals, similar to the way DOIs have enabled reference linking across journals. Given a specific scientist's permission, AGU can also add published papers to his or her ORCID record. See our statement <https://eos.org/agu-news/agu-opens-its-journals-to-author-identifiers>. We can also provide credit to you through ORCID when you serve as a reviewer.

If you have not already created an ORCID or linked it to your GEMS record, please do so as soon as possible. This will need to be completed for us to accept your paper. You can both create and link and ORCID from your GEMS record.

New supporting information guidelines

AGU now requires that supporting information be included in one file, except where limited by file type or size. Please see Supporting Information Guidelines in Author Resources (<http://publications.agu.org/author-resource-center/>).

When you are ready to submit your revision, please login to your account (<https://grl-submit.agu.org/cgi-bin/main.plex>), and click "Revise 2017GL076268."

I look forward to receiving your revised manuscript. If you have any questions, please contact the editor's assistant at grlonline@agu.org.

Sincerely,

Merav Opher
Editor
Geophysical Research Letters

Задачи Проекта, которые должны быть решены в 2018 году

1. Провести исследование динамики несимметричного токового слоя с целью определения условий, способствующих пересоединению. С использованием моделей изгибного токового слоя планируется провести численное моделирование параметров токового слоя с целью выявления условий, благоприятных для начала пересоединения и, соответственно, срыва неустойчивости/возникновения колебаний
2. Провести исследование распространения волн и развития неустойчивостей в изгибном токовом слое посредством аналитического рассмотрения и численного моделирования
3. Провести исследование несимметричного пересоединения на магнитопаузе и формирования магнитного барьера.
4. Провести исследование влияния угла поворота ММП на эффективность пересоединения на дневной стороне. Эффективность пересоединения предполагается оценивать по потенциалу в полярной шапке, времени задержки, и интенсивности продольных токов с использованием спутниковых измерений и данных по наземным индексам
5. Сделать оценку накопления потока в хвосте для симметричных и несимметричных конфигураций магнитосферы. Это исследование предполагается провести с использованием доработанной версии модели Цыганенко, разработанной для (уточненного) моделирования

хвоста магнитосферы по многолетней базе спутниковых данных в долях магнитосферного хвоста ([Tsyganenko, 2000])

Ожидается публикация двух статей в реферируемых журналах в 2018 году .

Ожидаемые в конце 2018 г. научные результаты

- (1) Квазидинамическое обобщение для модели изгибаемого токового слоя. Определение посредством численного моделирования динамических параметров (скорость дрейфа, электрическое поле и др.). Выделение условий, благоприятных для пересоединения.
- (2) Исследование изгибаемого слоя на устойчивость, численное моделирование роста неустойчивостей и распространения волн в асимметричном токовом слое.
- (3) Усовершенствованные модели несимметричного пересоединения. Оценка параметров несимметричного пересоединения. Прогноз разницы в эффективности для симметричного и несимметричного пересоединения (для сравнения с последующим экспериментальным исследованием)
- (4) Оценка эффективности пересоединения в зависимости от угла поворота ММП, статистическое распределение в зависимости от уровня асимметрии.
- (5) Оценка накопления потока в хвосте для симметричных и несимметричных конфигураций магнитосферы: мы ожидаем, что симметричные конфигурации более эффективны в накоплении потока (копится больший поток), а значит для них выше порог срыва суббури.