

«Утверждаю»
академик-секретарь
Отделения физических наук РАН
академик РАН



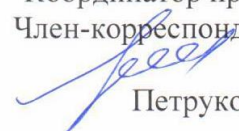
И.А. Щербаков
2015 г.

АННОТАЦИОННЫЙ ОТЧЁТ за 2015 год

По Программе фундаментальных исследований
Отделения физических наук РАН

«Динамика разреженной плазмы в космосе и лаборатории»

Координатор программы
Член-корреспондент РАН


Петрукович А.А.



Содержание

стр.

1. Аннотация программы.....	3
2. Участники программы.....	4
3. Проекты программы.....	5
4. Смета программы на 2015 г.....	6
5. Обзор работ по программе.....	7
6. Сводка научных результатов программы.....	9
7. Список публикаций по программе.....	21

1. Аннотация программы

Плазма – наиболее распространенное состояние видимого вещества во Вселенной. Благодаря наличию далекодействующих электромагнитных сил в плазменных средах протекают интенсивные процессы конверсии и переноса энергии, управляемые коллективными эффектами. В наземных условиях подобная динамика плазмы определяет ее стабильность, удержание и нагрев в лабораторных установках, в том числе в УТС. В космосе эти процессы ответственны за ускорение частиц, динамику магнитного поля, в конечном счете, за излучение в астрофизических объектах, на Солнце, в магнитосфере Земли. Однако удаленные астрофизические плазменные объекты мы можем изучать только по их излучению, достигающему Земли. В плазменных оболочках Земли и гелиосфере возможно проводить наблюдения «изнутри» плазмы, с борта искусственных спутников. Космические и лабораторные эксперименты по изучению свойств плазмы дополняют друг друга. Спутниковые исследования позволяют получать экспериментальные данные в диапазонах масштабов по пространству и времени, а так же в условиях высокой разреженности недоступных в лаборатории. Напротив, на Земле возможно проводить измерения в повторяемых, контролируемых условиях, что недоступно в природных космических средах. Безусловно необходимыми элементами подобных исследований являются построение теоретических моделей и численные расчеты.

Основной целью программы является определение механизмов развития фундаментальных процессов в плазме: пересоединения, турбулентности, ускорения частиц, и т.п. экспериментальным путем (в космосе и лаборатории), теоретическими методами и посредством компьютерного моделирования.

В значительной степени программа опирается на задел, полученный в ходе работ по предыдущей программе ОФН-15 «Физика плазмы в солнечной системе» (2006-2011 гг.)

Задачи, решавшиеся в ходе исследований 2015 г:

1. Динамика тонких токовых слоев: формирование, структура, разрыв
2. Нелинейная динамика заряженных частиц, ускорение.
3. Взаимодействия волна-частица и генерация излучений
4. Возникновение турбулентности и ее роль в процессах переноса.
5. Холловские эффекты в плазме.
6. Развитие экспериментальной техники
7. Развитие численных методов

2. Участники программы

Состав Совета Программы «Динамика разреженной плазмы в космосе и в лаборатории»

Петрукович Анатолий Алексеевич – координатор программы, член-корреспондент РАН, ИКИ.

Франк Анна Глебовна - заместитель координатора программы, доктор физико-математических наук, ИОФ

Члены совета программы:

Голубев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, ИПФ

Ерохин Николай Сергеевич, доктор физико-математических наук, ИКИ

Зеленый Лев Матвеевич, академик РАН, ИКИ

Зыбин Кирилл Петрович, член-корреспондент РАН, ФИАН

Козелов Борис Владимирович, доктор физико-математических наук, ПГИ

Малова Хельми Витальевна, доктор физико-математических наук, НИИЯФ МГУ и ИКИ.

Ученый секретарь программы:

Зольникова Надежда Николаевна, кандидат физико-математических наук, ИКИ РАН

Организации - участники программы ОФН-15

- Институт космических исследований РАН
- Институт прикладной физики РАН
- Институт общей физики РАН
- Физический институт РАН
- Физико-технический институт РАН
- Полярный геофизический институт РАН

3. Проекты программы

Направления и проекты	Организации исполнители	Рук. Проекта
1. Динамика и эволюции токовых слоев в условиях генерации токов Холла – исследования методами лабораторного моделирования	ИОФ РАН	д.ф.-м.н. Франк А.Г.
2. Аналитическая теория магнитостатических структур в плазме с произвольными энергетическими распределениями частиц	ИПФ РАН	чл.-корр. РАН Кочаровский В. В.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование токовых слоев в магнитосфере	ИКИ РАН, ПГИ КНЦ РАН	д.ф.-м.н. Малова Х.В. к.ф.-м.н. Мингалев О.В.
4. Лабораторное моделирование взаимодействия волн и частиц в неравновесной плазме магнитосферы	ИПФ РАН	д.ф.-м.н. Костров А.В
5. Нелинейное взаимодействие заряженных частиц с когерентными электромагнитными структурами и заряженными телами	ИКИ РАН	д.ф.-м.н. Васильев А.А. д.ф.-м.н. Красовский В.Л.
6. Турбулентные процессы в гигантских молекулярных облаках	ФИАН	д.ф.-м.н. Истомин Я.Н.
7. Исследование роли внешне-магнитосферных резонансов и перемежаемой турбулентности на перенос через плазменные границы	ИКИ РАН	д.ф.-м.н. Савин С.П.
8. Исследование холловской магнитной гидродинамики и неустойчивости в предфронте бесстолкновительной ударной волны в космической плазме	ФТИ РАН	д.ф.-м.н. Урпин В.А. д.ф.-м.н. Быков А.М.

4. Смета программы на 2015 г

№ п/п	Наименование организации	Объем финансирования (тыс. рублей) в 2015 году
1.	Институт космических исследований (ИКИ)	
2.	Институт прикладной физики (ИПФ)	
3.	Институт общей физики (ИОФ)	
4.	Физический институт (ФИАН)	
5.	Полярный геофизический институт (ПГИ)	
6.	Физико-технический институт (ФТИ)	
	Итого	

5. Обзор работ по программе

Средства и методы исследований

1. Для лабораторных работ были задействованы и частично модернизированы следующие установки:

- Установка плазмы электронного циклотронного резонансного разряда в прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке, поддерживаемого мощным СВЧ излучением гиротрона (ИПФ).
- Установки «Крот» и «Ионосфера» с ВЧ нагревом плазмы для моделирования нелинейных взаимодействий волн и частиц (ИПФ).
- Установка ТС-3D для исследований динамики токовых слоев (ИОФ).
- Установка КИ-1 с моделью магнитосферы («террелла») (ИЛФ).

2. Использовались наблюдательные данные околоземных космических проектов «Интербол», «Спектр-Р», «Polar», «Cluster», «Geotail» и пр, доступные в международных базах данных и у участников программы.

3. Развита методы численного моделирования, включающие кинетические, МГД, гибридные и Холловские коды. Начаты работы по параллельным вычислениям с использованием суперкомпьютеров (ИКИ, ФИАН, ПГИ, ИЛФ, ИПФ).

4. Теоретические исследования велись практически в рамках всех проектов.

Обзор направлений исследований

Проведены комплексные исследования по отдельным направлениям:

1. Исследования токовых слоев. Рассмотрены устойчивость слоев, двухмерная и трехмерная структура слоев, роль быстрых потоков и структура поля температур плазмы. Развита подходы к моделированию, позволяющие существенно ускорить вычисления. В качестве приложений рассматривались токовые слои в хвосте магнитосферы Земли и в магнитосфере Юпитера. Работы в данном направлении ведутся на протяжении ряда последних лет коллективом авторов из ИКИ, ПГИ, ИОФ, ИПФ.

2. Исследования турбулентности, ускорения частиц на турбулентных полях, генерации магнитного поля. Показана важная роль турбулентных полей со свойством перемежаемости в ускорении частиц. Рассмотрены подходы к описанию нелинейного взаимодействия заряженных частиц с когерентными электромагнитными структурами.

3. Исследования переноса массы, энергии и импульса через границы. Проведены сравнительные исследования турбулентных процессов переноса в различных средах: в магнитосфере и аэродинамических трубах.

4. Исследования микроэффектов, связанных с взаимодействием единичных частиц и объектов с локальными полями. Исследована возможность перехода от численного расчета к асимптотической модели. Начата работа по кинетическому моделированию транзиентных эффектов взаимодействия частиц плазмы с зондом, в том числе роли захваченных ионов.

Статистика публикаций

- Статьи, опубликованные в зарубежных рецензируемых журналах – 10.
- Статьи, опубликованные в российских журналах, включенных в список ВАК – 8
- Из них – в изданиях, включенных в список WoS – 16 .
- Главы в монографиях – 1
- Статьи, отправленные в печать – 6 .
- Выступления на конференциях (тезисы в материалах конференций) – 38 .

Другое

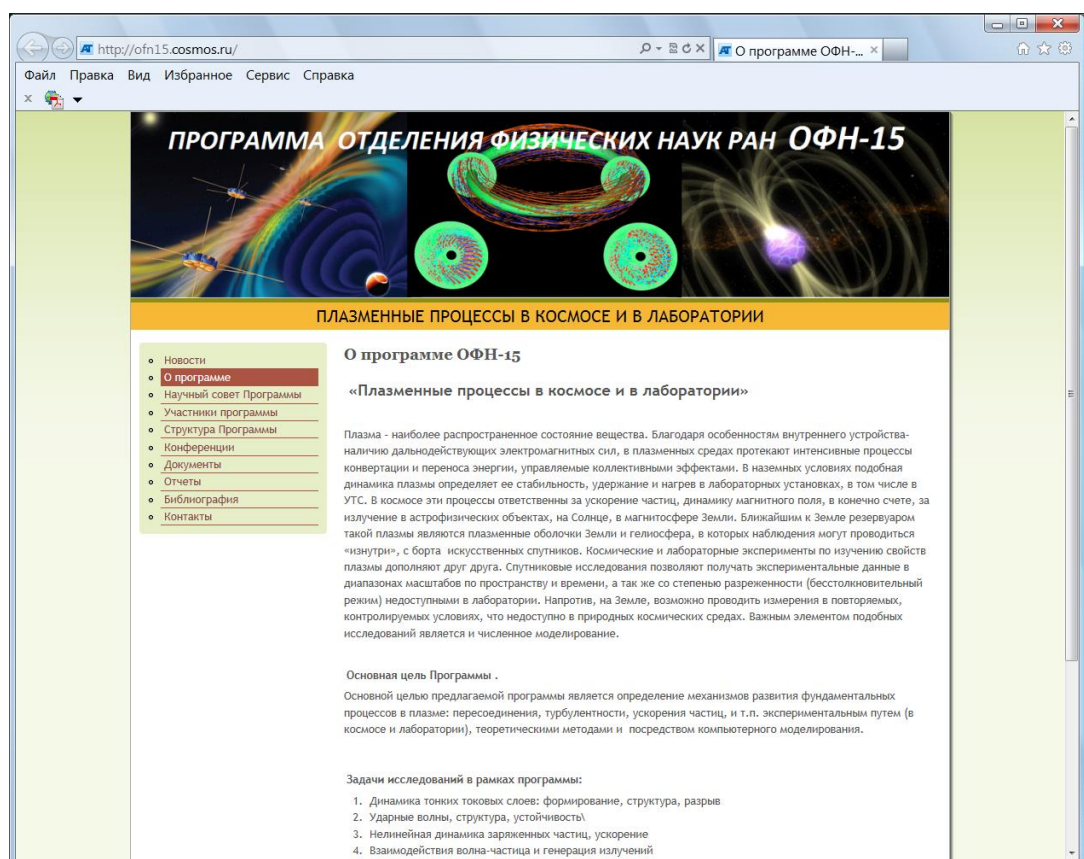
При поддержке программы проводится ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (февраль, ИКИ РАН, Москва).

Так же необходимо отметить другие конференции, наиболее близкие к тематике программы:

- Конференция «Проблемы Геокосмоса», проводится раз в два года, СПбГУ, Санкт-Петербург.
- Конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, проводится ежегодно, февраль, Звенигород, Московской области

Программа ОФн-15 в сотрудничестве с программой Президиума РАН П-22 готовит издание монографии «Современные проблемы гелиогеофизики».

Регулярно обновляется интернет-сайт программы ofn15.cosmos.ru



6. Сводка научных результатов программы

Проект 1. Динамика и эволюции токовых слоев в условиях генерации токов Холла – исследования методами лабораторного моделирования (руководитель - д.ф.-м.н. Франк А.Г., ИОФ РАН)

Исследования динамики и эволюции токовых слоев, формируемых в целенаправленных лабораторных экспериментах, были сосредоточены в 2015 г. преимущественно на двух проблемах. Во-первых, это изучение пространственных распределений температуры ионов в зависимости от расстояния до X линии вдоль ширины токовых слоев, которые развиваются в различных условиях. Во-вторых, это анализ основных параметров токовых слоев, формируемых в 2D и 3D магнитных конфигурациях, и сосредоточенной в нем плазмы.

1. Динамика плазмы в токовых слоях определяется преимущественно структурой сил Ампера, которые в 2D магнитных полях вызывают сжатие тока и плазмы вдоль оси y и расширение в x -направлении, а в 3D полях могут приводить также к деформации токовых и плазменных слоев. В реальных токовых слоях нормальная к поверхности слоя компонента магнитного поля, как правило, отлична от нуля, что приводит к возникновению сил, направленных вдоль поверхности слоя, из центральной области наружу, к обоим боковым краям. Под действием этих сил происходит ускорение плазмы и генерация направленных сверхтепловых потоков, которые ранее были зарегистрированы в наших экспериментах. Генерация потоков плазмы приводит к весьма существенным последствиям. Во-первых, при внедрении потоков плазмы в сильное поперечное магнитное поле у концов токового слоя возбуждаются индукционные электрические поля и токи, направленные в противоположную сторону по отношению к основному току в слое. В результате у боковых краев слоя электрический ток вначале быстро уменьшается, а затем даже может изменить направление, т.е. в токовом слое возникают обратные токи. Во-вторых, у боковых краев слоя может значительно возрасти концентрация плазмы.

2. В 2015 г. были проведены исследования пространственно-временных распределений температуры однократно ионизованных ионов аргона в токовых слоях, которые формировались при разряде в аргоне в 2D и 3D магнитных конфигурациях. Изучались зависимости температуры ионов от расстояния до X линии вдоль ширины слоя, в последовательные моменты времени.

Измерения проводились методами спектроскопии. Температура ионов аргона определялась из доплеровских уширений спектральной линии $\text{Ar II } 480.6 \text{ нм}$, измеренных вдоль направления тока, протекающего в слое. Излучение плазмы принималось из квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока, и с помощью линзы отображалось на торец кварцевого световода, расположенного практически в фокусе линзы. Диаметр световода составлял 0.65 мм , длина $\sim 10 \text{ м}$. Поперечное уменьшение оптической системы равнялось ~ 40 , а продольное ~ 1600 , соответственно. Пространственное разрешение измерений составляло $\sim 2.6 \text{ см}$. Излучение плазмы по световоду передавалось на входную щель монохроматора МДР-3 с обратной линейной дисперсией $D = 1.3 \text{ нм/мм}$. Профили излучаемых плазмой спектральных линий регистрировались в одном импульсе работы установки, с помощью программируемой электронно-оптической камеры «Nanogate 1-UF», длительность строб-импульса составляла $\Delta t = 0.8 \text{ мкс}$.

Для изучения зависимостей $T_i(x, t)$ кварцевая линза и торец световода, служившие для приема излучения плазмы, закреплялись на одном оптическом столике, который в процессе измерений перемещался вдоль ширины слоя, т.е. вдоль оси x , в плоскости симметрии слоя, $y = 0$. Измерения проводились, как в центральной области токового слоя, $\Delta x = 0 \pm 1.3$ см, так и в двух областях, сдвинутых относительно центральной области на $+3$ и $+6$ см. С учетом симметрии токового слоя относительно плоскости $x = 0$, многократно проверенной

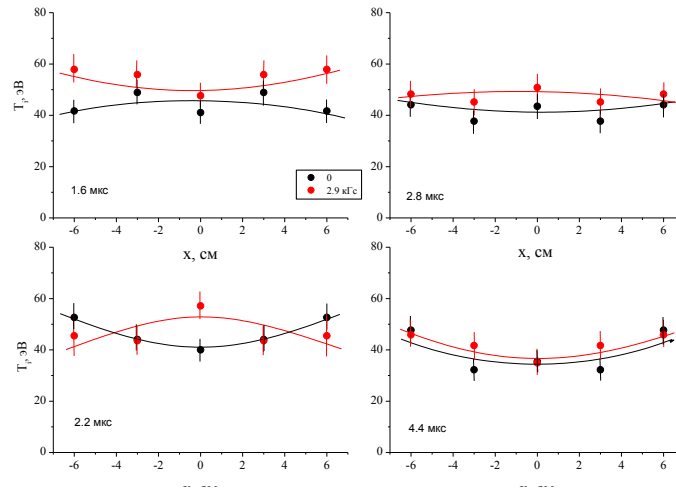


Рис.1. Распределения температуры ионов аргона вдоль ширины токового слоя, сформированного в 2D и 3D магнитных конфигурациях при разряде в аргоне, в последовательные моменты времени: $t = 1.6 \pm 0.5, 2.2 \pm 0.5, 2.8 \pm 0.5, 4.4 \pm 0.5$ мкс.

экспериментально, данные, полученные при ($x > 0$) экстраполировались на область ($x < 0$).

Эксперименты проводились при разряде в аргоне, при давлении $p = 28$ мТорр, градиент поперечного магнитного поля составлял $h = 0.57$ кГс/см, продольное магнитное поле B_z либо отсутствовало ($B_z = 0$, 2D магнитная конфигурация), либо его величина составляла 2.9 кГс (3D магнитная конфигурация), амплитуда тока плазмы достигала значений $J_z^{max} = 46/49$ кА (при $B_z = 0/2.9$ кГс). Анализ полученных результатов показал, что распределения температуры ионов аргона $T_i(x, t)$ мало изменяются в процессе эволюции токовых слоев в интервале $t \approx 1.5 - 4.4$ мкс, оставаясь практически однородными как в 2D, так и в 3D магнитной геометрии, рис.1. При формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации температура ионов аргона Ar II в центре слоя составляет $T_i = 40 \pm 5$ эВ в интервале $t \approx 1.5 - 3.0$ мкс, уменьшаясь до величины $T_i = 35 \pm 5$ эВ к моменту $t \approx 4.4$ мкс. Температура ионов аргона Ar II в периферийных областях токового слоя, при $x \approx 3 - 6$ см, изменяется в более широком диапазоне значений: $T_i \approx 35 - 55$ эВ в интервале $t \approx 1.5 - 4.4$ мкс. Температура ионов аргона в 3D магнитной конфигурации почти всегда несколько превышает температуру ионов аргона в 2D конфигурации, но эта разница невелика и находится в пределах экспериментальной погрешности, рис.1.

Согласно результатам, полученным методом голографической интерферометрии, распределения концентрации электронов в токовом слое, сформированном в аргоновой плазме, практически однородны вдоль ширины слоя, так что градиентом давления плазмы вдоль ширины слоя можно пренебречь. На основании полученных данных можно сделать вывод, что в данных условиях ускорение плазмы и генерация сверхтепловых потоков обусловлены преимущественно силами Ампера.

3. В результате исследований, проведенных в рамках проекта, анализа и сопоставления полученных данных было обнаружено существенное влияние, как поперечного градиента, так и продольной компоненты магнитного поля на структуру и временную эволюцию токового слоя и сосредоточенной в нем плазмы. Установлено, что имеются некоторые различия в пространственной структуре тока и плазмы. Полученные результаты имеют довольно общий характер, так что наблюдавшиеся особенности проявляются при создании начальной плазмы, в которой развивается токовый слой, в различных газах (гелий, аргон, криптон), т.е. при изменении массы ионов в 10-20 раз.

На рис.2 представлены двумерные распределения концентрации электронов в виде изолиний $N_e(x,y)$, соответствующие последовательным стадиям эволюции токового слоя. Цифры на рисунке соответствуют значениям N_e , умноженным на 10^{15} см^{-3} . Токовый слой формировался в гелии, при давлении $p = 320 \text{ мТорр}$, градиент поперечного магнитного поля составлял $h = 0.43 \text{ кГс/см}$, продольное магнитное поле $B_z = 0$, амплитуда тока плазмы $J_z^{\text{max}} \approx 36 \text{ кА}$. Как видно из рисунка, плотность плазмы максимальна в центральной области слоя, при этом толщина минимальна в центре слоя и увеличивается по мере удаления от него. Однако на поздней стадии ($t \approx 5.6 \text{ мкс}$) у

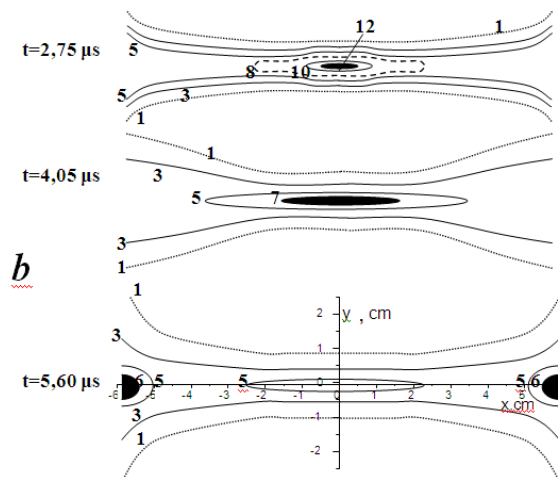


Рис.2. Структура плазмы на последовательных стадиях эволюции в токового слоя.

боковых концов слоя возникают области повышенной плотности плазмы, как отмечалось выше.

Рис.3 иллюстрирует влияние продольной компоненты магнитного поля B_z на максимальную плотность электронов N_e^{max} в средней плоскости слоя и на толщину слоя $2\Delta_{0.5}$ (по уровню плотности $0.5 \cdot N_e^{\text{max}}$) при двух градиентах магнитного поля: $h = 0.28 \text{ кГс/см}$ (a,b) и 0.43 кГс/см (c,d). Токовый слой формировался в гелии, при давлении $p = 320 \text{ мТорр}$, амплитуда тока плазмы $J_z^{\text{max}} \approx 36 \text{ кА}$, $t \approx 3 \text{ мкс}$. Сплошные линии (1) соответствуют значениям N_e^{max} и $2\Delta_{0.5}$ в центре слоя, при $x=0$, а пунктирные линии (2) – на краю слоя, при $x=5 \text{ см}$. При всех значениях B_z в центральной области слоя концентрация плазмы минимальна при меньшем градиенте, рис.3a, и максимальна при большем градиенте, рис.3c. Уменьшение концентрации электронов в центральной части слоя в присутствии продольной компоненты магнитного поля B_z сопровождается увеличением $2\Delta_{0.5}$, т.е. утолщением слоя, рис.3b,d. Этот эффект обусловлен усилением продольной компоненты B_z в пределах слоя благодаря увлечению магнитного поля

при сжатии плазмы на стадии формирования токового слоя.

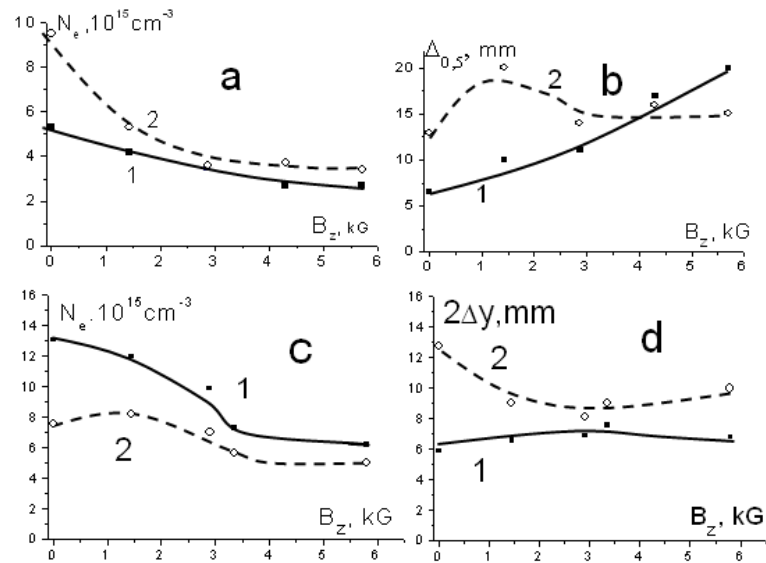


Рис.3. Зависимости $N_e^{\max}$ (a, c) и $\Delta_{0,5}$ (b, d) от величины продольной компоненты B_z .

Анализ поперечной структуры тока и плазмы в токовых слоях показал, что в основных чертах эти распределения согласуются между собой, хотя имеются и различия. Распределения плотности тока $j_z(y)$ и концентрации электронов $N_e(y)$ приведены на рис.4 для двух сечений слоя ($x = -0.8; -5$ см) и для двух стадий эволюции ($t \approx 2.7; 5$ мкс). Эти распределения нормированы на плотность тока $j_z^0 = 2.8 \text{ кА/см}^2$ и плотность плазмы $N_e^{\max} \approx 1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, которые соответствуют моменту времени $t \approx 2.7$ мкс. Во время стабильной стадии эволюции слоя ($t \approx 2.7$ мкс), как плотность тока, так и концентрация электронов в центре слоя примерно в 1.5 раза больше, чем на краю, а поперечные размеры на краю больше, чем в центре, рис. 4a,c. На поздней стадии эволюции происходит уменьшение, как плотности тока, так и концентрации электронов, а также увеличение толщины слоя, что проявляется в наибольшей степени на краю слоя рис. 4 b,d. При этом плотность тока в центре по-прежнему больше чем на краю, примерно в 2.5 раза, тогда как концентрация электронов на краю несколько превышает концентрацию в центре, рис. 4d, что соответствует появлению на краях слоя сгустков плазмы, см. рис.2.

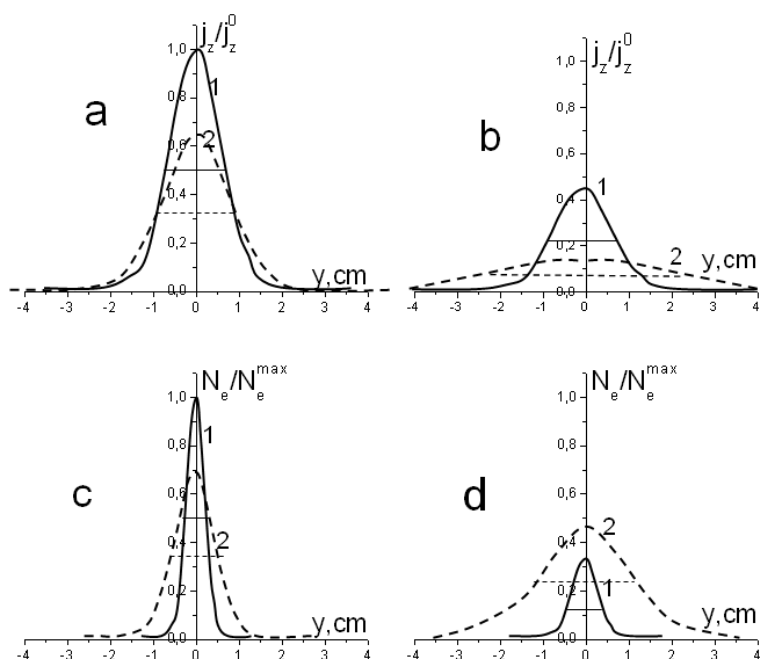


Рис. 4. *a, b* – Поперечные профили плотности тока $j_z(y) / j_z^0$ в центре слоя ($x = -0,8$ см) (1) и на краю слоя ($x = -5$ см) (2) для моментов времени $t = 2,7$ мкс (*a*) и $t = 5$ мкс (*b*). *c, d* – Поперечные распределения концентрации электронов $N_e(y) / N_e^{\max}$ в центре слоя при $x = -0$ (1) и на краю слоя при $x = -5$ см (2)

Проект 2. Аналитическая теория магнитостатических структур в плазме с произвольными энергетическими распределениями частиц (руководитель - чл.-корр. РАН Кочаровский В. В.)

Установлен и проанализирован универсальный критерий, описывающий порог и область неустойчивых волновых чисел в задаче об апериодической генерации магнитного поля в анизотропной релятивистской плазме с центрально симметричной функцией распределения частиц по импульсам, обладающей плоскостью симметрии.

Проведено аналитическое исследование областей неустойчивых волновых чисел и инкрементов вейбелевской неустойчивости для релятивистских функций распределения частиц в виде по-разному профилированных трубок.

Развит метод построения и дана классификация широкого ряда плоскостойких токовых структур с широким силовым линиям магнитного поля и произвольным распределением частиц по энергиям.

С использованием точно решаемых моделей токовых слоёв с полистепенным распределением частиц по импульсам проанализированы спектрально-угловые особенности собственного синхротронного излучения, выходящего из самосогласованных токовых структур в релятивистской плазме. Для определённых секторов углов наблюдения этого излучения продемонстрирована возможность существования различного числа доминирующих степенных компонент, часть из которых может отсутствовать среди доминирующих степенных компонент излучения изотропного ансамбля частиц с таким же энергетическим распределением.

Проект 3. Теоретическое и экспериментальное исследование токовых слоёв в магнитосфере (руководители - д.ф.-м.н. Малова Х.В. , к.ф.-м.н. Мингалев О.В.)

С помощью самосогласованной кинетической модели тонкого токового слоя, основанного на методе макрочастиц, исследованы токовые равновесия с самосогласованной сдвиговой магнитной компонентой B_y . Показано, что сдвиговые конфигурации могут появляться в результате самосогласованной эволюции при некотором небольшом магнитном возмущении B_y в центре токового слоя. Показано, что в системе с малой нормальной компонентой, как правило, формируется симметричная сдвиговая конфигурация. При больших значениях - преобладает асимметричная структура.

Построена самосогласованная стационарная осесимметричная МГД модель магнитодиска Юпитера с учетом центробежной силы и электрического поля коротации. Рассмотрен механизм униполярной генерации и крупномасштабная система токов. В приближении слабого азимутального магнитного поля, получены величины прямого и обратного биркеландовских токов. Результаты моделирования согласуются с оценками из других работ и с экспериментальными данными.

Построена численная гибридная самосогласованная модель ТТС, в которой натяжение магнитных силовых линий уравнивается инерцией ионов, движущихся через слой. Показано, что с ростом параметра адиабатичности толщина токового слоя уменьшается вследствие уменьшения гирорадиусов ионов, что приводит к росту вклада дрейфовых электронных токов вблизи нейтральной плоскости. Найдены пределы изменения параметра адиабатичности, вне которых токовый слой не формируется. Обсуждаются последствия существования параметрических границ равновесных решений для ТТС в реальных геомагнитных условиях.

Рассмотрен процесс самосогласованного сжатия тонкого токового слоя под действие электрического поля конвекции, в условиях, когда нормальная компонента магнитного поля уменьшается со временем. Показано, что структура полученного равновесия определяется начальными параметрами модели и динамикой частиц в процессе сжатия слоя. Предложены механизмы эволюции токового слоя в хвосте магнитосферы Земли и формирования его многомасштабности.

Проведено обобщение самосогласованные модели тонких токовых слоев в бесстолкновительной плазме с учетом сдвиговой компоненты магнитного поля. Исследованы токовые равновесия в присутствии: 1) глобальной (постоянной в слое) сдвиговой компоненты $B_y = \text{const}$; 2) самосогласованной шировой компоненты B_y ; 3) сдвиговой компоненты смешанного типа. Показано, что структура токового слоя в присутствии магнитного шира существенным образом меняется, что обусловлено динамикой частиц плазмы.

Разработан новый метод численного решения стационарного уравнения Власова в ограниченной области пространства для задач, в которых плотность тока поддерживается за счет падающих извне потоков плазмы. Типичными примерами таких задач являются токовые слои размерности 1D3V и 2D3V. Новый метод, в отличие от метода крупных частиц, удобен для эффективной организации массивно параллельных вычислений на кластерных суперкомпьютерах с выполнением основного объема вычислений на графических процессорах (GPU), а также имеет строгое и ясное математическое обоснование. В новом методе рассчитываются значения функции распределения на адаптивной сетке в фазовом пространстве одной частицы. Возможны варианты или 2-го, или 4-го порядка точности.

В предыдущих исследованиях для моделирования стационарных конфигураций бесстолкновительного тонкого токового слоя (далее ТТС) нашей группой для численного решения стационарного уравнения Власова использовался вариант метода самосогласованного трассирования, который был ранее разработан нами на основе метода крупных частиц. Однако этот метод не удобен для реализации на графических процессорах (GPU), а также не позволяет эффективно находить функцию распределения в любой точке пространственной сетки из области моделирования. Поэтому нами разработан новый метод, который по сравнению с предыдущим, хотя и требует на один или два порядка большего объема вычислений, за счет

эффективного использования графических процессоров (GPU) позволяет в разы сократить время расчетов.

Проект 4. Лабораторное моделирование взаимодействия волн и частиц в неравновесной плазме магнитосферы (руководитель - д.ф.-м.н. Костров А.В)

1. Подробно экспериментально исследованы эффекты взаимного обогащения спектра (интермодуляции) интенсивных волн свистового диапазона на общей трассе распространения. В модельном эксперименте, поставленном на стенде «Крот», волны свистового диапазона в диапазоне частот 50 – 200 МГц на уровне мощности 1 – 500 Вт возбуждались с помощью антенн и распространялись в канализированном режиме, в дакте с пониженной плотностью плазмы, формировавшемся за счет нагрева плазмы в ближней зоне антенн и ее последующего термодиффузионного перераспределения. Было установлено, что спектр одной (пробной) волны при прохождении через модифицированную другой, амплитудно-модулированной, волной (накачкой) область плазмы обогащается сателлитами, отстроенными от несущей на частоту модуляции накачки: в лабораторном эксперименте наблюдается кросс-модуляция низкочастотных волн, подобная той, которая имеет место при проведении активных ионосферных экспериментов. Уровень сателлитов ниже уровня сигнала на основной частоте (несущей) приблизительно на 40 – 50 дБ, причем спектр пробной волны обогащается несимметрично: амплитуда «красного» сателлита превышает амплитуду «синего» сателлита. Спектральный анализ показывает, что пробная волна, проходя через возмущенную модулированной накачкой плазму, испытывает комбинированную амплитудно-частотную модуляцию. Уровень сателлитов, возникающих в спектре пробной волны, относительно уровня несущей уменьшается с повышением частоты модуляции накачки, при этом на полученных зависимостях можно выделить два характерных участка. При больших периодах модуляции накачки обогащение спектра пробных волн происходит преимущественно за счет возмущений плотности плазмы, при малых периодах модуляция пробных волн обусловлена, предположительно, механизмом «магнитной» нелинейности.

2. В модельном эксперименте, выполненном на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», исследовано взаимодействие низкочастотных пробных волн свистового диапазона с динамическими мелкомасштабными неоднородностями, формируемыми при воздействии на замагниченную плазму интенсивного электромагнитного излучения. По постановке эксперимент воспроизводит круг физических явлений, развивающихся при распространении низкочастотных волн через область ионосферной плазмы, модифицированную лучом нагревного стенда. Установлено, что неоднородности концентрации приводят к глубокой амплитудной модуляции, обогащению пространственной структуры и спектра пробных низкочастотных волн, которые в натурном эксперименте возбуждались наземным сверхдлинноволновым передатчиком, а в лабораторной плазме – с помощью антенн. В подробных лабораторных исследованиях был установлен пороговый характер эффекта развития мелкомасштабных неоднородностей по мере увеличения мощности греющего поля; мелкомасштабные неоднородности предположительно обусловлены развитием дрейфовой неустойчивости в модифицированной области плазмы.

3. Проведены исследования кинетических неустойчивостей в плазме ЭЦР разряда, создаваемой и поддерживаемой в открытой магнитной ловушке мощным излучением микроволнового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса. В динамике ЭЦР разряда можно выделить три характерные стадии, отличающиеся параметрами плазмы. На первой стадии, длительностью порядка 100 мкс, концентрация плазмы невелика и энергии СВЧ излучения, поглощенной в плазме, хватает для нагрева электронов до релятивистских энергий. На второй стадии, вплоть до конца импульса греющего излучения

гиротрона, концентрация плазмы более чем на два порядка превосходит концентрацию на первой стадии. Начало третьей стадии определяется моментом выключения микроволнового излучения гиротрона, поддерживающего плотную плазму в ловушке, после чего плотная холодная плазма быстро распадается. При этом концентрация горячей компоненты уменьшается медленнее и через некоторое время становится сравнимой с концентрацией распадающейся холодной плазмы. Обнаружено пять различных типов кинетических неустойчивостей, которые развиваются на разных стадиях ЭЦР разряда.

На стадии развитого разряда обнаружено излучение плазмы в квазипродольном относительно магнитного поля направлении на частотах около $f_{ce0}/2$. Спектр этого типа излучений состоит из эквидистантных полос, частота которых может синхронно изменяться. Данный тип излучения проинтерпретирован как генерация волн свистового диапазона частот в плотной плазме разряда. Одновременно обнаружено излучение плазмы другого типа на частотах между f_{ce0} и $2f_{ce0}$. При этом особенностью данного типа излучения является наличие резкой верхней границы в динамическом спектре излучения, которая изменяется во времени пропорционально $2f_{ce0}$.

Проект 5. Нелинейное взаимодействие заряженных частиц с когерентными электромагнитными структурами и заряженными телами (руководители - д.ф.-м.н. Васильев А.А., д.ф.-м.н. Красовский В.Л.)

В рамках проекта исследовано явление захвата электронов свистовыми волнами большой амплитуды, распространяющимися с малыми и большими углами по отношению к силовым линиям геомагнитного поля. В такой системе неоднородность фонового магнитного поля может привести к эффективному ускорению захваченных частиц. Были получены аналитические выражения для вероятности захвата электронов для обоих случаев параллельного и наклонного распространения волн. Численное интегрирование траекторий частиц позволило продемонстрировать точность полученных аналитических оценок. Для реалистических амплитуд волн, вероятности захвата, как правило, сопоставимы для наклонного и параллельного распространения волн. Захват ускорение 100 кэВ электронов в основном обеспечивается волнами с наклонным распространением, в то время как параллельные волны ответственны за захват ускорения электронов с энергиями больше 100 кэВ.

В 2015-м году продолжены численные эксперименты моделирующие процессы зарядки поглощающей сферы в бесстолкновительной плазме. В ходе усовершенствования алгоритма моделирования и программного продукта достигнута значительно более высокая точность расчетов. В частности, показано, что численное решение задачи с достаточной точностью сшивается с аналитической асимптотической формулой, описывающей пространственную зависимость электрического потенциала на больших расстояниях и временах. Наряду с определением пространственно-временных зависимостей макроскопических физических величин, численные эксперименты позволяют наблюдать временную эволюцию распределений электронов и ионов в фазовом пространстве во всех подробностях. Плотное облако захваченных ионов формируется вблизи заряженного тела. Захваченные ионы дают значительный вклад в экранирование тела, тем самым определяя структуру плазменного слоя экранирующего заряженный объект. Параллельно, эффект влияния захваченных частиц рассмотрен также аналитическими методами на примере классической задачи об экранировании точечного заряда.

Проект 6. Турбулентные процессы в гигантских молекулярных облаках (руководитель - д.ф.-м.н. Истомин Я.Н.)

Проведено сопоставление теоретических моделей образования неоднородностей электронной концентрации в F-области ионосферы при воздействии на нее мощной электромагнитной волны с непосредственными наблюдениями, выполненными на зондирующих ракетах. Это позволило определить их спектр и амплитуду по поперечным к магнитному полю размерам. Эти размеры меняются в широком диапазоне от нескольких электронно-циклотронных радиусов до десятков ионно-циклотронных радиусов, в то время как вдоль магнитного поля неоднородности сильно вытянуты и достигают размеров в десятки километров. Распространение зондирующих радиоволн в такой неоднородной среде, чьи размеры поперек меньше их длин волн, носит характер дифракции. Дифракционные характеристики позволили определить амплитуду неоднородностей плотности и относительную площадь, занимаемую неоднородностями в поперечном к магнитному полю направлении. Как следует из теории, в экспериментах, выполненных в 1987 г. на стенде «СУРА», она составляла величину около десяти процентов.

Проект 7. Исследование роли внешне-магнитосферных резонансов и перемежаемой турбулентности на перенос через плазменные границы (руководитель - д.ф.-м.н. Савин С.П.)

С использованием все новых экспериментальных данных в космической и лабораторной плазме, а также в аэродинамических течениях, расширено подтверждение универсальности таких свойств турбулентности в погранслоях, как: (i) обобщенное самоподобие в погранслоях; (ii) супердиффузия с универсальными скейлингами; (iii) доминирование нитевидных филаментарных структур в процесса переноса и диссипации; (iiii) развитие и релаксация перемежаемости по мере приближения и пересечения погранслоев потоками вещества.

Проведен повторный обзор последних экспериментальных, теоретических, численных и статистических исследований в области перемежаемой турбулентности космической и лабораторной плазмы. Впервые проведено сравнение со свежими данными по гидромагнитной турбулентности в аэродинамических трубах, а также впервые использованы данные потока плазмы в погранслое земной магнитосферы со спутника СПЕКТР-Р как с рекордным временным разрешением, так и с расширенным диапазоном низких частот, что позволило выявить, как на СПЕКТРЕ-Р, так и ИНТЕРБОЛЕ-1, новые магнитосферные резонансы.

Подтверждена высокая степень универсальности свойств перемежаемой турбулентности как в космической и лабораторной плазме, так и в гидродинамических течениях. Так, наблюдаются свойства расширенного самоподобия, а характер переноса в погранслоях соответствует супердиффузии: $\langle x^2 \rangle \sim \tau^{1.2-1.8}$, где $\langle x^2 \rangle$ - среднеквадратичное смещение частицы в турбулентном поле, а τ - время смещения. Вдали от границ подтверждается классический закон диффузии: $\langle x^2 \rangle \sim \tau$.

Выявлены примеры гипердиффузии ($\langle x^2 \rangle \sim \tau^{2.3}$) вблизи ударной волны, свидетельствующие об ускорении сверх-магнитозвуковых струй вблизи ударной волны.

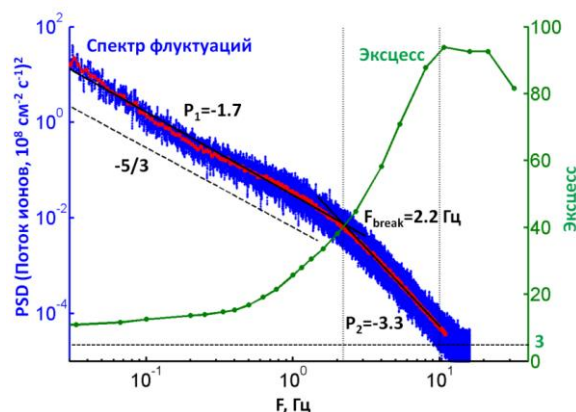


Рис. 5. Характерный пример спектра флуктуаций потока ионов солнечного ветра и зависимости величины эксцесса от частоты флуктуаций для интервала 27-28/09/2011 23:00-09:00 UT. Рост эксцесса к малым масштабам отражает перемежаемый характер потока.

Проект 8. Исследование холловской магнитной гидродинамики и неустойчивости в предфронте бесстолкновительной ударной волны в космической плазме (руководители - д.ф.-м.н. Урпин В.А., д.ф.-м.н. Быков А.М.)

Магнитные поля, встречающиеся во многих космических объектах, способны замагничивать плазму и приводить к анизотропии транспортных процессов. Плазма называется замагниченной, если параметр Холла, равный произведению гирочастоты электронов на время их релаксации, больше 1. Поскольку замагниченная плазма часто встречается и в космических объектах и в лаборатории, исследование ее гидродинамики представляет большой интерес. В частности, важное значение имеет изучение процессов образования неоднородностей химического состава в многокомпонентной плазме, поскольку в космических условиях плазма обычно является многокомпонентной и в ней часто наблюдаются неоднородности химического состава (пятна). В рамках данного проекта проведено исследование ряда магнитогидродинамических процессов, приводящих к образованию таких химических неоднородностей.

Исследована возможность формирования химических неоднородностей в атмосферах звезд под действием электрических токов. Такие неоднородности наблюдаются у многих звезд ранних спектральных классов, причем у этих же звезд обычно наблюдаются и довольно сильные магнитные поля. Поскольку поля создаются электрическими токами, то вполне возможно, что эти токи играют определенную роль и в диффузионных процессах и таким образом способствуют формированию химических структур. Показано, что благодаря эффекту Холла электрические токи могут по-разному действовать на различные компоненты плазмы, в результате чего эти компоненты движутся также по-разному. Различия в движении компонент приводят к тому, что они по-разному распределяются в плазме, т.е. происходит формирование химических структур. Формирование химических неоднородностей под действием электрических токов может происходить даже при сравнительно слабых магнитных полях, которые не способны замагничивать плазму. Такие явления наблюдаются во многих звездах, у которых заметные химические неоднородности существуют уже при наличии относительно слабых магнитных полей (так называемые Hg-Mn звезды). Поскольку рассмотренный механизм обусловлен эффектом Холла, то он приводит к дрейфу примесных ионов в направлении, перпендикулярном и магнитному полю, и электрическому току. Поэтому распределение химических пятен на поверхности звезды может быть очень сложным и должно существенно зависеть от геометрии магнитного поля и электрического тока. Рассмотренный механизм

диффузии может играть важную роль не только в атмосферах звезд, но и в других астрофизических объектах (магнитосферы звезд и планет, короны, межзвездная среда), а также в лабораторной плазме.

Диффузионные процессы в замагниченной плазме могут сопровождаться появлением особого типа магнитогидродинамических осцилляций. Эти осцилляции также обусловлены эффектом Холла и, в случае малой амплитуды, характеризуются только колебаниями концентрации малых примесей. Остальные же параметры плазмы колебаний не испытывают. Такие локальные колебания химического состава существуют в плазме, в которой магнитное давление превышает газовое, и могут быть обнаружены при спектральных наблюдениях плазмы. Диффузионные волны могут наблюдаться как в космической плазме, так и в лабораторных условиях.

Астрофизические ударные волны (УВ) в межпланетной, межзвездной и межгалактической среде являются бесстолкновительными. В бесстолкновительных УВ изменения скоростей плазменных потоков и температур компонент плазмы при пересечении фронта УВ устанавливаются не через кулоновские столкновения, а через взаимодействие заряженных частиц с флуктуациями микроскопических и мезоскопических электрических и магнитных полей. Флуктуирующие магнитные поля формируются за счет плазменных неустойчивостей. В сильных ударных волнах с эффективным ускорением энергичных надтепловых частиц существенную роль могут играть плазменные неустойчивости, связанные с анизотропными распределениями нетепловых частиц в предфронте УВ. Прямое микроскопическое моделирование процесса релаксации ионных и электронных температур с учетом неустойчивостей в предфронте УВ на основе первых принципов требует недоступных на сегодня вычислительных мощностей, поэтому строятся макроскопические многожидкостные плазменные модели.

Одним из открытых вопросов является отношение температур электронов и ионов за фронтом УВ в зависимости от ее числа Маха. Числа Маха астрофизических ударных волн находятся в интервале от нескольких единиц в межпланетной и межгалактической среде, до величин порядка тысячи в УВ молодых остатков сверхновых. Наблюдательные данные для УВ с большими числами Маха, суммированные в работах, указывают на сильную зависимость бесстолкновительной релаксации температур от числа Маха. В ходе выполнения проекта в 2015 году рассмотрены общие термодинамические соотношения для минимальных возможных отношений электронных и ионных температур, которые должны, как ожидается, быть функциями числа Маха. Основное положение рассмотренной модели состоит в том, что поток энтальпии электронов сохраняется отдельно от потока энтальпии ионов, но при этом все сорта частиц испытывают один и тот же скачек плотности при переходе через ударный фронт, в соответствии с сохранением условия квазинейтральности плазмы. Единственной формой дополнительного электронного нагрева, которая допускается этой моделью, является адиабатический нагрев, вызванный сжатием электронного газа (противоположный предельный случай был исследован нами ранее в работах). Эти предположения позволяют получить аналитические отношения электронных и ионных температур за фронтом (Рис. 6. Сплошная черная кривая), которые согласуются с наблюдениями бесстолкновительных УВ: при низких числах Маха, отношение температуры электронов к температуре ионов близко к единице, тогда как для чисел Маха близких к $M_5 \approx 60$ отношение электронной температуры к ионной асимптотически стремится к отношению $T_e/T_i = m_e/\langle m_i \rangle$. В диапазоне промежуточных чисел Маха отношение электронной температуры к ионной имеет зависимость $T_e/T_i \propto M_5^{-2}$. Дополнительно было рассчитано отношение электронной температуры к ионной в предположении об изменении температуры электронов только за счет адиабатического нагрева (Рис. 6. Штриховая черная кривая), данный расчет дает большее отношение температур, но сохраняется вид зависимости температур от числа Маха $T_e/T_i \propto M_5^{-2}$. Также показано, что для замагниченных УВ отношение электронной температуры к ионной (Рис. 6. Штриховые синие

кривые, параметр β – отношение тепловой энергии плазмы к магнитной в далеком предфронте УВ, где температуры электронов и ионов предполагаются равными) стремится к асимптотическому значению $T_e/T_i = m_e/\langle m_i \rangle$ для низких магнитозвуковых чисел Маха (M_{ms}), главным образом потому, что для сильно замагниченных УВ звуковое число Маха больше, чем магнитозвуковое число Маха ($M_{ms} \leq M_s$). Предсказанная зависимость отношения электронной температуры к ионной находится в согласии с наблюдательными данными для магнитозвукового числа Маха между 2 и 10, но для остатков сверхновых из этих соотношений следует, что подразумеваемые при интерпретации наблюдательных данных числа Маха переоценены из-за дополнительного нагрева в предфронте УВ, модифицированном космическими лучами. Дополнительно к предсказаниям минимальных отношений электронных температур к ионным, в разработанную модель также включен (эвристическим образом) электронно-ионный теплообмен на УВ, количественно описываемый безразмерным параметром ξ , который обозначает долю разницы между потоками энтальпии электронов и ионов, которая используется для выравнивания температур электронов и ионов (Рис. 6. Штриховая алая кривая). Сравнение модели с существующими наблюдениями в солнечной системе и наблюдениями остатков сверхновых звезд показывает, что данные могут быть наилучшим образом описаны моделью при $\xi \geq 5\%$. Такое сравнение, возможно, также указывает на то, что числа Маха УВ некоторых остатков сверхновых переоценены из-за наличия дополнительного нагрева в предфронте УВ, модифицированном космическими лучами.

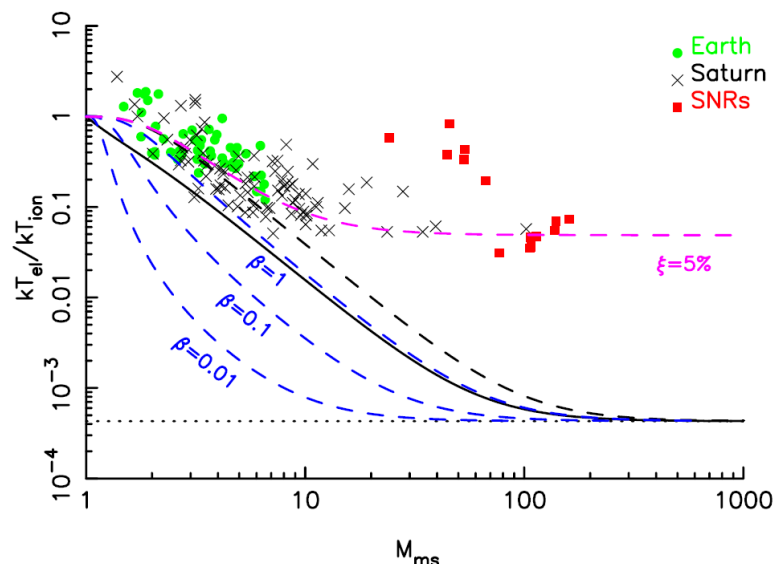


Рис. 6. Обозначения кривых приведены в тексте. Точки экспериментальных данных: зеленые круги – отношение температур, измеренное за головной ударной волной Земли, данные из работы, черные “х” – отношение температур, измеренное космической станцией Кассини за головной ударной волной Сатурна, данные из работы, красные квадраты – остатки сверхновых, данные из работы].

7. Список публикаций по программе:

Статьи в зарубежных реферируемых журналах:

1. Vl. Kocharovsky, V. Kocharovsky, V. Martyanov, S. Tarasov, “The breaks and the hidden components in the power-law spectra of synchrotron radiation of the self-consistent current structures”, *Physics of Plasmas*, 22 (8), 2015, 083303. DOI: 10.1063/1.4928905.

2. Malova H.V., Mingalev O.V., Grigorenko E.E., Mingalev I.V., Melnik M.N., Popov V.Yu., Delcourt D.C., A.A. Petrukovich, Shen C., Rong Z.J., Zelenyi L.M. Formation of self-organized shear structures in thin current sheets, *Journal of Geophysical Research*, v. 120, 2015, doi:10.1002/2014JA020974.
3. Sasunov Y., Khodachenko M., Alexeev I., Belenkaya E., Semenov V., Kubyshkin I., Mingalev O. Investigation of scaling properties of a thin current sheet by means of particle trajectories study // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 02/2015; 120(3). DOI:10.1002/2014JA020486
- 4.
5. M. Viktorov, D. Mansfeld and S. Golubev, Laboratory study of kinetic instabilities in a nonequilibrium mirror-confined plasma // *EPL*. 2015. V.109, N.6. P.65002.
6. A.A. Kiselyov, M. S. Dolgonosov, V. L. Krasovsky, Formation of trapped-ion population in the process of charging of an absorbing sphere in a collisionless plasma. *Euro.Physics Letters*, Vol.111, 15001 (2015)
7. V. P. Budaev, L. M. Zelenyi and S. P. Savin, Generalized self-similarity of intermittent plasma turbulence in space and laboratory plasmas, *J. Plasma Phys.*, vol. 81, 395810602, p. 1–53, doi:10.1017/S0022377815001099, (2015, обзор, 53 стр., 188 ссылок)
8. L.V. Kozak, A.S., Prokhorenkov, S.P. Savin, Statistical analysis of the magnetic fluctuations in boundary layers of Earth's magnetosphere, *Advances in Space Research*, **56**, 2091–2096, (2015)
9. RIAZANTSEVA, M. O., BUDAEV, V. P., ZELENYI, L. M., ZASTENKER, G. N., PAVLOS, G. P., SAFRANKOVA, J., NEMECEK, Z., PRECH, L. & NEMEC, F., Dynamic properties of small scale solar wind plasma fluctuations. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 373, 20140146. (2015)
10. V. Urpin «Element spots in Ap and Hg-Mn stars from current-driven diffusion», *Astronomische Nachrichten*, 336, 266, 2015.
11. Vink J., Broersen S., Bykov A., Gabici S., On the electron-ion temperature ratio established by collisionless shocks, *Astronomy & Astrophysics*, V. 579, id. A13, 2015.

Статьи в российских реферируемых журналах:

1. Юшков Е.В., Франк А.Г., Артемьев А.В., Петрукович А.А., Васько И.Ю. Формирование квазиодномерного токового слоя в лабораторной и магнитосферной плазме // *Физика плазмы* 2015. Т. 41(1). С.73-91.
2. А.Г. Франк, Н.П. Кирий. Экспериментальные исследования магнитной структуры и динамики плазмы в токовых слоях // *Успехи Прикладной физики* 2015. Т.3, вып.5, С.454-470.
3. Г.В. Островская, В.С. Марков, А.Г. Франк. Пространственная структура электрического тока и распределение концентрации электронов в токовых слоях, формируемых в гелии, в зависимости от исходных параметров магнитного поля и плазмы // *Физика плазмы* 2016. Т. 42 (1).
4. Улькин А.А., Малова Х.В., Попов В.Ю., Зеленый Л.М., Моделирование различных сценариев равновесия тонкого токового слоя в хвосте магнитосферы Земли, *Физика плазмы*, №1, Т.41, №2, С. 170-187, 2015. (In Engl.: Ul'kin A.A., Malova H.V., Popov V.Yu, Zelenyi L.M., Modeling of Different Scenarios of Thin Current Sheet Equilibria in the Earth's Magnetotail, *Plasma Physics Reports*, Maik Nauka/Interperiodica Publishing, V.41, № 2, с. 154-170).

5. Кислов Р.А., Малова Х. В., Васько И.Ю., Двумерная МГД модель магнитодиска Юпитера, Космические исследования, 2015, Т.53, №5, С. 374-387; (R. A. Kislov, H. V. Malova, s. I. Y. Vasko, Two Dimensional MHD Model of the Jovian Magnetodisk, Cosmic Research, 2015, Vol. 53, No. 5, pp. 341–353, 2015, DOI: 10.1134/S0010952515050068).
6. М.Е. Виктор, А.В. Водопьянов, С.В. Голубев, Д.А. Мансфельд, А.Г. Николаев, В.П. Фролова, Г.Ю. Юшков, Экспериментальный стенд для исследования взаимодействия плотных сверхзвуковых потоков плазмы с магнитным полем арочной конфигурации // Письма в ЖТФ, 2015, Т. 41, вып. 18, С.74-81.
7. Н.А.Айдакина, М.Е. Гуцин, И.Ю.Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, А.В. Стриковский. Кроссмодуляция волн свистового диапазона частот в магнитоактивной плазме. Письма в ЖЭТФ, Т.101, №4, с.254-257 (2015).
8. В.Л. Фролов, В.О. Рапопорт, Е.А. Шорохова, Н.А. Айдакина, М.Е. Гуцин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, М. Парро, Ж.-Л.Рош. Тонкая структура дактов плотности, формирующихся при активном радиочастотном воздействии на лабораторную и космическую плазмы. Письма в ЖЭТФ, Т.101, №5, с.342-346 (2015).

Монографии:

1. Малова Х.В. , О.В. Мингалев, В.Ю. Попов, А.А. Петрукович, Л.М. Зелёный, Особенности внутренней структуры токовых слоев в бесстолкновительной плазме в присутствии шировой компоненты магнитного поля, в книге: Современные достижения в плазменной гелиогеофизике, под. Ред. А. Садовского, Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского, М., 2015; <http://sdpg.cosmos.ru>.

Направлено в печать:

1. Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк, Д.Г. Васильков, Е.В. Воронова. Распределения температуры ионов, концентрации электронов и газокINETического давления ионной компоненты плазмы вдоль поверхности токового слоя // Физика плазмы 2016. Т. 42, в печати.
2. Zelenyi L.M., Frank A.G., Artemyev A.V., Petrukovich, A.A., Nakamura R. Formation of sub-ion scale filamentary force-free structures in the vicinity of reconnection region // Plasma Physics and Controlled Fusion 2016. in press.
3. Домрин В. И., Малова Х. В., Артемьев А. В., Кропоткин А. П. Особенности формирования тонкого токового слоя в хвосте земной магнитосферы, Космические исследования, Космические исследования, 2016, в печати.
4. Я.Н. Истомин, В.Ю. Ким, «Модификация электронной концентрации в ионосфере в окрестности плазменного резонанса волны накачки», Геомагнетизм и Аэрoномия, в печати, 2016.
5. V.P. Budaev, L.M. Zelenyi, S.P. Savin, Intermittency and generalized self-similarity in turbulent boundary layers of laboratory and magnetospheric plasmas, accepted to *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, by IOPscience UK (2015)

6. V. Urpin «Compositional waves and variations in the atmospheric abundances of magnetic stars», *Astrophysics and Space Science*, 2015 (в печати).

Материалы конференций:

1. Anna G. Frank, Galya V. Ostrovskaya. Holographic Interferometry in Investigations of the Current Sheet Plasmas // *Proceedings of Science*, 2015. ECPD2015. P. 003(1-6).
[http://pos.sissa.it \(ECPD2015\)003](http://pos.sissa.it (ECPD2015)003)
2. С.Н. Сатунин, А.Г. Франк. Динамика токов Холла и колебания периферийных областей токового слоя // Тезисы докладов XLII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2015 г. С.205.
3. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г., Васильков Д.Г., Воронова Е.В. Распределения температуры ионов аргона и гелия по ширине токовых слоев, сформированных в 2D и 3D магнитных конфигурациях // Тезисы докладов XLII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2015 г. С.249.
4. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин. ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ТОКОВОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ТОКОВ ХОЛЛА // <http://solarwind.cosmos.ru>, тезисы доклада на 10-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» под эгидой Программы ОФН-15, Москва, ИКИ РАН, 16-20 февраля 2015 г. С.158.
5. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г., Васильков Д.Г., Воронова Е.В. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ И НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ // <http://solarwind.cosmos.ru>, тезисы доклада на 10-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» под эгидой Программы ОФН-15, Москва, ИКИ РАН, 16-20 февраля 2015 г. С.160.
6. Anna G. Frank, Galya V. Ostrovskaya. Holographic Interferometry in Investigations of the Current Sheet Plasmas // Abstract for 1-st EPS Conference on Plasma Diagnostics. Frascati, Italy, April 14-17, 2015. Book of Abstracts. <http://www.ecpd2015.enea.it>
7. Франк А.Г., Островская Г.В., Сатунин С.Н. ЭВОЛЮЦИЯ И ДИНАМИКА ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ СЛОЯ // Тезисы докладов XLIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2016 г. в печати.
8. Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк, Д.Г. Васильков, Е.В. Воронова. Быстрые направленные потоки плазмы с ионами разной массы в токовых слоях и их влияние на магнитную структуру слоя // Тезисы докладов XLIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2016 г. в печати.
9. V.I.V. Kocharovsky, V.V. Kocharovsky, V.Yu. Martyanov, S.V. Tarasov, "1D analytical solutions to the magnetostatic problem in relativistic plasma with arbitrary energy distribution of particles. Method of invariants of particle motion".- Int. Conf. Shilnikov Workshop 2014, Nizhni Novgorod, Russia, December 17-19, 2014; Book of abstracts, pp. 19-23// http://www.shilnikov.unn.ru/en/archive/workshop_2014/book_of_abstracts.html
10. V.I.V. Kocharovsky, V.V. Kocharovsky, V.Yu. Martyanov, S.V. Tarasov, "Analytical theory of self-consistent current sheets in multicomponent relativistic plasma with arbitrary energy distribution of particles" // Talk at the Conference "High-Energy Phenomena in Relativistic Outflows V" (Argentina, La Plata, Oct. 5 – 8, 2015). Conference program, p. 3.

11. Малова Х.В., А.А. Улькин, В.Ю. Попов, Л.М. Зеленый, МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАВНОВЕСИЯ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, Десятая ежегодная конференция «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РАН СБОРНИК ТЕЗИСОВ, С. 157.
12. Мингалев О.В., И.В. Мингалев, Х.В. Малова, М.Н. Мельник, Л.М. Зеленый, ЗАВИСИМОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ, Десятая ежегодная конференция «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РАН СБОРНИК ТЕЗИСОВ, с. 158.
13. Малыхин А.Ю., Е.Е. Григоренко, Х.В. Малова, ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ДИНАМИКЕ ИОНОВ В ЗАМКНУТЫХ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ, Десятая ежегодная конференция «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РАН СБОРНИК ТЕЗИСОВ, С. 161
14. Кислов Р.А., О.В. Хабарова, Х.В. Малова, МГД-модель осесимметричного плазменного слоя, Десятая ежегодная конференция “Физика плазмы в солнечной системе” 16-20 февраля, 2015, Сборник тезисов, с. 155, ИКИ РАН, Москва, Россия.
15. Dominique Delcourt, Helmi V Malova, and Elena A Kronberg, Nonadiabatic Ion Behavior During Substorm Reconfiguration of the Magnetotail, Chapman conference on magnetospheric dynamics, September, 2015.
16. Кислов Р.А., О.В. Хабарова, Х.В. Малова, МГД-модель гелиосферного плазменного слоя Конференция молодых учёных “Фундаментальные и прикладные исследования” 13-15 апреля 2015, ИКИ РАН, Москва, Россия.
17. Kislov R.A., O. V. Khabarova, H.V. Malova, A new model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet , International school for young astronomers “Magnetoplasma processes in relativistic astrophysics” 7-11th September, Tarusa, Russia.
18. Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н. Новый метод численного решения системы Власова-Максвелла. // 10-я Ежегодная Конференция «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ», 16–20 ФЕВРАЛЯ 2015 г., СБОРНИК ТЕЗИСОВ, ИКИ РАН, с. 145, Москва, 2015.
19. М.Е. Viktorov, S.V. Golubev, D.A. Mansfeld, V.V. Zaitsev. Laboratory studies of kinetic instabilities under double plasma resonance condition in a mirror-confined non-equilibrium plasma // Труды 38 ежегодного Апатитского семинара «Физика авроральных явлений», г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 02.03.2015-06.03.2015 г.
20. Mikhail Viktorov, Dmitry Mansfeld, Sergey Golubev, Alexander Vodopyanov, Georgy Yushkov. Interaction of dense supersonic plasma flows with an arched magnetic field // The 2015 International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS 2015). Pitlochry, Scotland, UK. 23.08.2015-28.08.2015. P.37.
21. Mikhail Viktorov, Dmitry Mansfeld, Sergey Golubev, Valery Zaitsev. Wave excitation under double plasma resonance condition in a mirror-confined plasma of ECR discharge // The 2015 International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS 2015). Pitlochry, Scotland, UK. 23.08.2015-28.08.2015. P.36.

22. Mikhail Viktorov, Sergey Golubev, Dmitry Mansfeld, Valery Zaitsev. Generation of electromagnetic radiation under double plasma resonance condition in a mirror-confined plasma produced by ECR discharge // 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (AT-RASC URSI 2015). Maspalomas, Gran Canaria, Spain. 18.05.2015-22.05.2015. H03-5.
23. М.Е. Викторов, С.В. Голубев, В.В. Зайцев, Д.А. Мансфельд. Импульсно-периодический режим кинетической неустойчивости плазмы ЭЦР разряда в условиях двойного плазменного резонанса // X конференция «Физика плазмы в солнечной системе». – ИКИ РАН, г. Москва, 16-20 февраля 2015 г. – С. 140.
24. Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров. Моделирование распространения свистовых волн в магнитоактивной плазме в присутствии мелкомасштабных неоднородностей. Тезисы докладов «Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», г. Москва, 9— 13 февраля 2015г., с. 231
25. Н.А. Айдакина, М.Е. Гушин, И.Ю. Зудин, С.В. Коробков, А.В. Костров, А.В. Стриковский. Исследование нелинейных эффектов, возникающих при распространении мощных радиоимпульсов свистового диапазона частот в магнитоактивной плазме. Тезисы докладов «Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», г. Москва, 9— 13 февраля 2015г., с. 294
26. А.А. Васильев, А.В. Артемьев. Нелинейное ускорение электронов наклонными свистовыми волнами: критическое значение амплитуды волны, 16-20 февраля 2015 г., ИКИ РАН, 10-ая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе".
27. Artemyev Anton. Resonant ion acceleration by dipolarization fronts in magnetotail, 12 – 17 April 2015, EGU General Assembly 2015 Abstract EGU2015-6462.
28. А. А. Киселев, М. С. Долгонос, В. Л. Красовский. Вклад захваченных частиц в экранирование сферического поглощающего тела в бесстолкновительной плазме. 16-20 февраля 2015 г., ИКИ РАН, 10-ая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе".
29. В. Л. Красовский. О нелинейном экранировании точечного заряда в бесстолкновительной плазме. 16-20 февраля 2015 г., ИКИ РАН, 10-ая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе".
30. Savin S., Budaev V., Zelenyi L., Safrankova J., Nemecek Z., Wang C., Kronberg E.A., Marcucci F., Consolini G., Blecki J., Kozak L. Experimental study of the turbulent cascades' development in outer magnetosphere: from solar wind waves/ discontinuities towards the nonlinear structures driving the intermittent turbulence. Доклад на конференции MSS2014, ИКИ РАН, (2014).
31. В. Б. Белуховский, С. П. Савин, В. А. Пилипенко, Л. А. Лежен, О воздействии сверхнизкочастотных резонансов во внешней магнитосфере на ионосферу, доклад на [десятой конференции «Физика плазмы в солнечной системе»](#) в ИКИ РАН, (2015),

32. В. В. Ляхов, С. П. Савин, В.М. Нецадим, С. И. Климов, Л. А. Лежен, О влиянии заряда на магнитопаузу на передачу импульса и энергии: теория – эксперимент, доклад на [десятой конференции «Физика плазмы в солнечной системе»](#) в ИКИ РАН, (2015),
33. С.П. Савин, В.П. Будаев, Л.М. Зеленый, Я. Шафранкова, З. Немечек, **Л.А. Лежен**, Развитие перемежаемости в потоке плазмы: от спокойного солнечного ветра до ночной границы, доклад на [десятой конференции «Физика плазмы в солнечной системе»](#) в ИКИ РАН, (2015), магнитосферы,
34. Sergey SAVIN, Vyacheslav BUDAEV, Jana SAFRANKOVA, Zdenek NEMECEK, Lev ZELENYI, Joerg BUECHNER, Elena KRONBERG, Jan BLECKI, Lyudmila KOZAK, Stanislav KLIMOV, Intermittency development via plasma jets in the solar plasma flow: from Maxwellian solar wind till hyperdiffusion, доклад на симпозиуме AOGS15-Abs-1219, numID: 1146, Singapore, (2015)
35. С.П. Савин, В.П. Будаев, Л.М. Зеленый, *Исследование развития перемежаемости в турбулентных каскадах на дневной и ночной границе магнитосферы*, XXIII Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 22-23 декабря 2014 г.
36. Jan Błęcki, Małgorzata Kościeszka, Michel Parrot, Sergey Savin, Jan Słomiński, Roman Wronowski, Can the Ionospheric Plasma Turbulence seen over the Earthquake be distinguished from the turbulence with another origin? Results of DEMETER Measurements, IAGA/IUGG, Praga 27.06.2015
37. J. Błęcki, K. Mizerski, K. Słomińska, J. Słomiński and S. Savin, The Filamentation of the TLE's, EPSC Abstracts, Vol. 10, EPSC2015-781, 2015, European Planetary Science Congress 2015, Nantes, 28 September, 2015
38. J. Błęcki(1), M. Parrot (2), J. Słomiński (1), M. Kościeszka (1), **S.Savin** (3), R. Wronowski, Ionospheric plasma turbulence seen over the earthquake. Results of DEMETER measurements, wykład zaproszony w Instytucie Geodynamiki Rumuńskiej Akademii, Bukareszt, 17.11.2015