

Фундаментальные и прикладные научные исследования в области Физики космической плазмы, энергичных частиц, Солнца и солнечно-земных связей

Тема ПЛАЗМА. Проведение фундаментальных исследований в области физики космической плазмы, солнечно-земных связей и физики магнитосферы.

Гос. регистрация № 0120.0 602992

Научный руководитель чл. корр. РАН Петрукович А.А.

Раздел Теория плазмы. Руководитель академик РАН Л.М. Зелёный.

1. Гибридная модель тонкого токового слоя в хвосте магнитосферы Земли.

Построена и исследована гибридная модель тонкого (толщиной ионного ларморовского радиуса) токового слоя в хвосте магнитосферы Земли. В численном эксперименте исследована структура ТТС и динамика частиц в нем в зависимости от изменения параметра адиабатичности κ и безразмерной нормальной компоненты магнитного поля для двух возможных сценариев: 1) нормальная магнитная компонента постоянна, а параметр адиабатичности растет, что соответствует эффективному уменьшению энергии частиц; 2) параметр адиабатичности растет пропорционально величине нормальной компоненты магнитного поля, что означает фиксированную энергию частиц. Найдены границы в параметрическом пространстве, внутри которых могут существовать равновесные токовые слои. Продемонстрировано, что в режимах, когда движение ионов подчиняется законам динамического хаоса, электронные дрейфовые токи могут поддерживать токовое равновесие, при этом толщина токового слоя может достигать порядка электронного гирорадиуса.

2. Двумерная МГД модель магнитодиска Юпитера.

Развита самосогласованная стационарная осесимметричная МГД модель магнитодиска Юпитера, в которой учтено наличие центробежной силы, электрического поля коротации и азимутального магнитного поля. Построено распределение магнитных силовых линий в магнитодиске, определена зависимость его толщины от расстояния до планеты. Показано, что толщина магнитодиска и распределение магнитного поля в нем практически не отличаются для изотермической и изоэнтропической моделей. Продемонстрировано, что учет малого фонового давления плазмы приводит к существенному уменьшению толщины магнитодиска, что обусловлено преобладанием центробежной силы над градиентом давления на большом удалении от планеты. Рассмотрен механизм униполярной генерации и связанная с данным механизмом крупномасштабная система токов. В приближении слабого азимутального магнитного поля, получены величины прямого и обратного биркеландовских токов. Показано, что результаты моделирования согласуются с оценками из других работ и с экспериментальными данными. Показано, что результаты моделирования согласуются с оценками из других работ и с экспериментальными данными.

3. Излучение молниевых разрядов в КНЧ диапазоне как постоянно действующий источник нагрева надтепловых ионов в верхней ионосфере Земли.

Исследован новый тип резонансного взаимодействия между надтепловыми ионами и специфическими волновыми пакетами ионно-циклотронных волн, в которых частота в каждой точке пространства близка к локальной ионной циклотронной частоте, а абсолютная величина волнового вектора в каждой точке пространства линейно возрастает

со временем. Показано, что такие пакеты формируются естественным образом из излучения молниевых разрядов. Этот тип резонансного взаимодействия волн и частиц, который до настоящего времени не рассматривался, оказывается очень эффективным и существенно влияет как на частицы, так и на волны, а именно, он ведет к сильному, недиффузионному нагреву частиц и одновременному поглощению волн. Поскольку молниевые разряды происходят постоянно по всему земному шару, рассмотренное взаимодействие является постоянно действующим механизмом нагрева ионов в околоземном космическом пространстве.

4. Исследование условий, при которых время монотонного изменения энергии резонансных частиц в поле двух волн существенно превышает нелинейное время взаимодействия с одной волной.

Исследовано резонансное взаимодействие электронов с двумя волнами: продольно распространяющейся свистовой волной и нижнегибридной волной, распространяющейся под большим углом к внешнему магнитному полю. Показано, что в зависимости от соотношений между амплитудами волн и расстоянием между резонансами в пространстве скоростей динамика частиц совершенно различна и имеет различные статистические свойства. Регулярное движение в случае изолированных резонансов, связанных с каждой из волн, сменяется стохастическим внутри ограниченной области фазового пространства при перекрытии резонансов. Наиболее поразительный эффект возникает тогда, когда резонансные скорости близки и происходит фазовый захват частиц – явление, типичное для случая резонансного взаимодействия частиц с одной монохроматической волной. В случае двух волн, однако, этот захват оказывается асимметричным и приводит к монотонному или квазимонотонному изменению импульсов частиц на интервале времени, много больше нелинейного периода.

5. Исследование влияния релятивистских эффектов и эффектов, связанных с распространением волн под углом к геомагнитному полю, на резонансное взаимодействие волн и частиц в магнитосфере.

Исследовано резонансное взаимодействие релятивистских электронов внешнего радиационного пояса со свистовыми волнами, генерируемыми наземным источником, распространяющимися под углом к геомагнитному полю. Показано, что при взаимодействии с такими «косыми» волнами возникает существенная асимметрия эффективной амплитуды взаимодействия относительно экватора. Благодаря этой асимметрии захваченные частицы после пересечения экватора выходят из захвата, что увеличивает эффективность ускорения таких частиц. Также было рассмотрено явление релятивистского ускорения с поворотом, которое является одним из наиболее эффективных механизмов ускорения в случае взаимодействия с волнами, распространяющимися вдоль геомагнитного поля. Показано, что при взаимодействии с «косыми» волнами, эффективная амплитуда взаимодействия оказывается асимметрична относительно точки поворота. Показано, что в рассматриваемых условиях релятивистское ускорение с поворотом становится менее эффективным, чем в случае взаимодействия с волнами, распространяющимися вдоль магнитного поля Земли.

6. Сопоставление эффективности ускорения электронов в радиационных поясах Земли за счёт рассеяния на волнах малой амплитуды и за счёт захватов в волны с большой амплитудой.

В рамках работы исследованы процессы рассеяния и ускорения электронов в радиационных поясах Земли. Для моделирования характеристик волновых полей использованы данные современных спутниковых миссий. Отдельно изучены нелинейные эффекты резонансного взаимодействия электронов с когерентными высокоамплитудными волнами и рассеяние электронов на низкоамплитудных волнах. Получены аналитические соотношения, определяющие доминирование нелинейных эффектов. Данные соотношения сопоставлены с измеряемыми амплитудами и частотными характеристиками вистлерных волн.

7. Исследование двумерной структуры токовых слоёв в хвосте магнитосферы Земли по данным THEMIS и в хвосте магнитосферы Юпитера (по данным GALILEO). Эмпирическая модель, описывающая распределение магнитного поля и плазменных параметров вдоль хвоста магнитосферы.

В рамках работы исследована структура токового слоя в магнитосферном хвосте Юпитера. Показано, что токовый слой является частично бессильным - плотность тока имеет существенную компоненту вдоль магнитного поля, магнитное поле имеет широкую компоненту с максимумом в нейтральной плоскости. Токовый слой представляет собой кинетическую структуру - его толщина сравнима с гирорадиусом тепловых ионов. Исследована вертикальная и горизонтальная структура токового слоя. Показано, что токовый слой не может быть описан в рамках двумерных МГД моделей. Построена аналитическая модель бессильного токового слоя с анизотропным тензором давления, которая описывает токовые слои наблюдаемые в магнитосферном хвосте Юпитера, а также бессильные токовые слои субионных масштабов наблюдаемые в магнитосферном хвосте Земли на аппаратах Cluster и THEMIS.

8. Влияние солнечного ветра на распределение потенциала вблизи лунной поверхности.

Поверхность Луны на освещенной Солнцем стороне, вследствие фотоэмиссии электронов и взаимодействия с плазмой солнечного ветра, приобретает электрический заряд. Проведено исследование влияния солнечного ветра на распределение потенциала вблизи лунной поверхности в широком диапазоне значений плотности эмитируемых фотоэлектронов. Обнаружено, что при любой плотности фотоэлектронов потенциал поверхности имеет наименьшее значение при распространении в системе медленного ветра. Показано, что хотя тепловая скорость электронов может превышать скорость солнечного ветра в несколько раз, учет направленной скорости потока в электронной функции распределения по скоростям приводит к существенным изменениям значений потенциала для участков лунного реголита небогатенных водородом, для которых работа выхода фотоэлектронов под действием солнечного излучения значительно выше, чем для участков, обогащенных водородом.

9. Одномерно-неоднородная плоскостная модель для исследования динамики развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (К-Г).

В рамках одножидкостной магнитной гидродинамики развита одномерно-неоднородная плоскостная модель для исследования динамики развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (К-Г). Плоскостная модель позволяет учесть как конечный поперечный размер переходного слоя, так и наличие тангенциального разрыва магнитного поля. На основе модели создан программный код, позволяющий вычислять собственные моды системы без необходимости прямого численного решения дифференциальных уравнений. Разработанная модель применима для изучения развития неустойчивости К-Г при

различных условиях в солнечном ветре. С использованием данной модели получены первые результаты о структуре собственных колебаний низкоширотной пограничной области дневной магнитопаузы для различных профилей скорости потока и плотности плазмы.

10. Сравнительный анализ данных наблюдений ленгмюровских волн на аппаратах WIND и STEREO с результатами численного моделирования ленгмюровской турбулентности.

Показано что во многих случаях имеется детальное сходство типичных наблюдаемых волновых форм с волновыми формами реконструируемыми по результатам моделирования с учетом относительной скорости спутника и солнечного ветра. На нескольких космических аппаратах были обнаружены модулированные пакеты ленгмюровских волн в различных областях, таких как солнечный ветер, электронный форшок и область полярных сияний ионосферы. Эти исследования выявили пульсирующий характер наблюдаемых волн, которые типично локализованы и формируют пакеты с пиковыми амплитудами на три порядка выше среднего. В работе представлены формы ленгмюровских сигналов, полученных в результате численного моделирования, самосогласованно описывающего резонансное взаимодействие электронного пучка с пакетами ленгмюровских волн в плазме со случайными колебаниями плотности. Эти волновые формы, полученные для различных профилей колебаний и диапазонов параметров, соответствующими параметрам электронных пучков и плазмы в радиовсплесках III типа на расстоянии 1 а.е. плотности, представлены в виде, в котором они наблюдаются при регистрации на спутнике, движущемся в солнечном ветре. Сравнение с данными измерений на спутниках STEREO и WIND показывает, что смоделированные характерные профили ленгмюровских волн очень похожи на наблюдаемые.

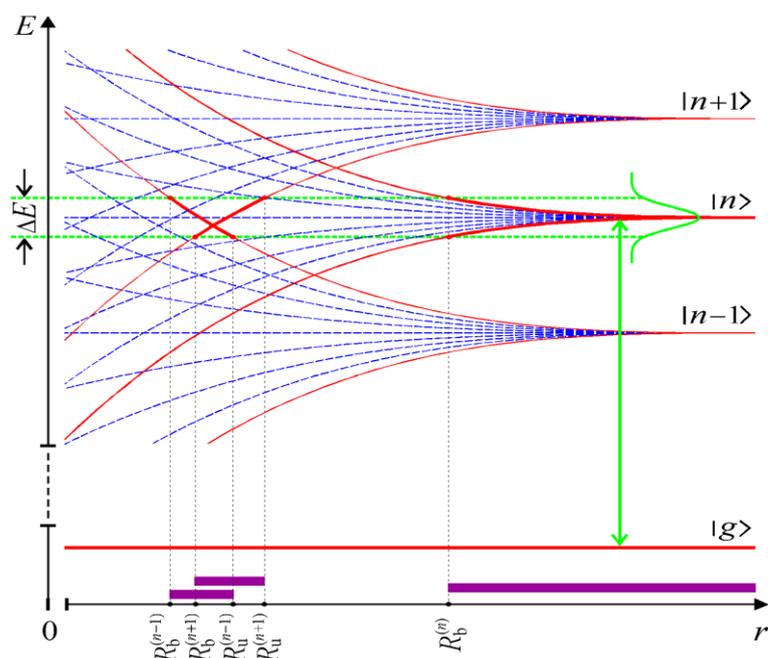
11. Гамильтоновские модели резонансного взаимодействия волна-частица в замагниченной и неоднородной плазме.

На ряде примеров продемонстрирована эффективность гамильтоновых моделей, описывающих самосогласованное взаимодействие волна-частица и волна-волна в однородной или неоднородной замагниченной плазме. В числе различных физических проблем, которые могут быть изучены с помощью предложенного метода входят задачи моделирования нелинейной и турбулентной стадии развития различных неустойчивостей плазмы с анизотропными распределениями электронов и ионов, релаксации потоков сверхтепловых частиц и насыщения роста волн. При этом были рассмотрены механизмы захвата частиц волной и выхода из захвата, взаимодействия волна-частица при кратных резонансах, квазилинейная диффузия частиц в волнах, в том числе в случайно-неоднородной плазме, ускорение частиц, волна фокусировки, рассеяния, отражения и затухания. Особо представлены наиболее свежие результаты моделирования, полученные при изучении Ленгмюровской турбулентности в присутствии электронных пучков, распространяющихся в неоднородной плазме солнечного ветра, где имеются случайные колебания плотности со средним уровнем до нескольких процентов от плотности фоновой плазмы.

12. Тонкая структура зоны ридберговской блокады в ультрахолодных газах.

Эффект ридберговской блокады состоит в том, что сильно-возбужденный атом создает вокруг себя дипольное электрическое поле, способное заблокировать возбуждение других атомов в его локальной окрестности. Это явление широко обсуждается в последние годы,

как в применении к физике плазмы (в частности, для создания систем с большой кулоновской неидеальностью), так и в ряде других областей (квантовая оптика, обработка квантовой информации и т.п.). Вплоть до настоящего времени, данный эффект рассматривался лишь в простейшем приближении, когда заблокированная область представляла собой сплошную сферу. Проведенный в настоящем исследовании более тщательный теоретический анализ показал, что область ридберговской блокады, на самом деле, должна состоять из совокупности концентрических оболочек, в которой заблокированные зоны чередуются с разблокированными.



13. Подсеточное моделирование для исследования сжимаемой магнитогидродинамической турбулентности космической плазмы.

Разработан метод для прямого численного моделирования магнитогидродинамической турбулентности на бета-плоскости. Метод основан на псевдоспектральном подходе с использованием сферических функций в качестве базисных. В данном методе линейные слагаемые аппроксимируются в спектральном пространстве, в то время как нелинейные слагаемые рассчитываются в физическом пространстве. Предложены и реализованы способы пересчета нелинейных слагаемых, учитывающие более сложную, по сравнению с рядами Фурье, структуру сферических функций. Сформулирован метод крупных вихрей для многожидкостных моделей плазмы. Получены отфильтрованные уравнения и найдены слагаемые, которые необходимо параметризовать. Проведены предварительные расчеты для двухжидкостной модели плазмы и показано что модель Смагоринского наиболее эффективно воспроизводит спектр турбулентности при их сравнении с результатами прямого численного моделирования. Разработанный способ аппроксимации подсеточных явлений адаптирован для использования метода конечных элементов, реализованного на адаптивных сетках.

14. Исследование нелинейной динамики магнитогидродинамических потоков на вращающейся сфере в приближении мелкой воды.

В работе впервые получены нелинейные магнитогидродинамические уравнения мелкой воды на вращающейся сфере. В качестве исходной рассматривается полная система

уравнений магнитной гидродинамики с вращением. Уравнения записаны для вращающегося слоя тяжелой магнитной жидкости со свободной границей в сферической системе координат с граничными условиями на нижней стенке и на свободной поверхности. Используя условия магнитогадростатичности распределения давления и малости толщины слоя по сравнению с характерным горизонтальным линейным размером и усредняя исходные уравнения в сделанных приближениях, получены уравнения тонкого слоя плазмы со свободной границей в поле сил тяжести на вращающейся сфере. Качественный анализ дисперсионных уравнений позволил выявить условие синхронизма для существования слабонелинейных волн Россби.

15. Обзор современного состояния теории сложных систем с приложениями в области астрофизики и физики космической плазмы.

Большое внимание в обзоре уделено статистической физике необратимых процессов, анализируется накопленный экспериментальный материал, выделены нерешенные проблемы как в общей теории, так и в свете обработки и интерпретации данных наблюдений. Рассмотрена взаимосвязь явления самоорганизованной критичности с представлениями о гидродинамической турбулентности, многомасштабности, эволюционными процессами, фазовыми переходами II рода. Обсуждаются общие механизмы возникновения критических состояний в нелинейных системах с обратной связью.

16. Исследование возникновения катастрофических явлений в сложных системах при усилении флуктуаций в критической области за счет фоновой турбулентности гидродинамического типа.

Такой механизм возникновения катастрофических явлений в сложных системах, как усиление флуктуаций в критической области за счёт фоновой гидродинамической турбулентности, ранее не исследовался, но представляет значительный интерес как для теории, так и для экспериментальной физики, в частности для физики токамаков. Амплитуда (в широком смысле) таких явлений может на порядки превышать «известные» значения, полученные на основе классической теории случайных процессов, а вероятность их возникновения – соответствовать характерным кинетическим процессам на временах жизни системы. Построена динамическая «гибридная модель», в которой возникновение турбулентных вихрей подчинено законам самоорганизованной критичности; показано, в какой мере спектр такой «турбулентности» отличается от колмогоровского.

17. Исследование ряда вопросов, связанных с самоорганизованным критическим поведением в нелинейной модели Андерсона.

С помощью дискретного уравнения Андерсона устанавливается связь иерархических процессов с основным кинетическим уравнением. В качестве простейшего примера рассмотрено отображение на дерево Кэли (известное в физике как решетка Бете). Сформулировано обобщение моделей самоорганизованного критического поведения на функциональные (гильбертовы) пространства, поднимается вопрос о квантовой самоорганизации к критическому состоянию. Обсуждается связь уравнения Андерсона с кинетическими уравнениями в дробных производных, показано, как дробная кинетика возникает из «недробной» динамики при учете нелинейности. Построена топологическая классификация дискретного уравнения Андерсона по порядку нелинейности, получены ограничения на тип самоорганизованного критического поведения в пределе больших времен.

18. Исследование процесса удвоения частоты электромагнитной волны в неоднородной ионосфере в слоях синхронизма гармоник.

Указан новый эффект нелинейной электродинамики неоднородной магнитоактивной плазмы – широкополосное резонансное удвоение частот радиоволн в условиях фазового синхронизма волны накачки и её второй гармоники. В отличие от известных эффектов генерации гармоник, связанных с плазменными резонансами и нагревом плазмы, указанный механизм удвоения эффективен в холодной плазме и определяется величиной магнитного поля и электронной плотностью плазмы в области прозрачности волн. Отмечена физическая аналогия указанного эффекта с генерацией второй гармоники в лазерном кристалле. Указана возможность применения этого эффекта для дистанционной нелинейной диагностики плазмы верхней ионосферы, где характерные размеры области синхронизма гармоник могут составить несколько километров. Показана возможность слабозатухающего распространения поверхностной волны вдоль границы градиентного неполярного диэлектрика с вакуумом; ослабление затухания связано с вытеснением волнового поля из градиентного слоя в вакуум. Показана возможность переноса излучения видимого и ИК диапазона в туннелирующем режиме через периодические градиентные диэлектрические наноструктуры.

19. Исследование электродинамики формирования заряда тела в космической плазме.

Численный эксперимент впервые позволил наблюдать во всех подробностях процесс зарядки поглощающей сферы в бесстолкновительной плазме. Установлено, что суммарный заряд облака захваченных ионов соизмерим с зарядом сферы, что подтверждает необходимость учета эффекта захвата в космической плазме для корректного решения задачи и строгого количественного описания самосогласованного электрического поля и параметров возмущенной плазмы. На рис. показано несколько стоп-кадров из фильма-анимации, используемого в ходе моделирования для визуального наблюдения эволюции во времени распределения ионов в фазовом пространстве.

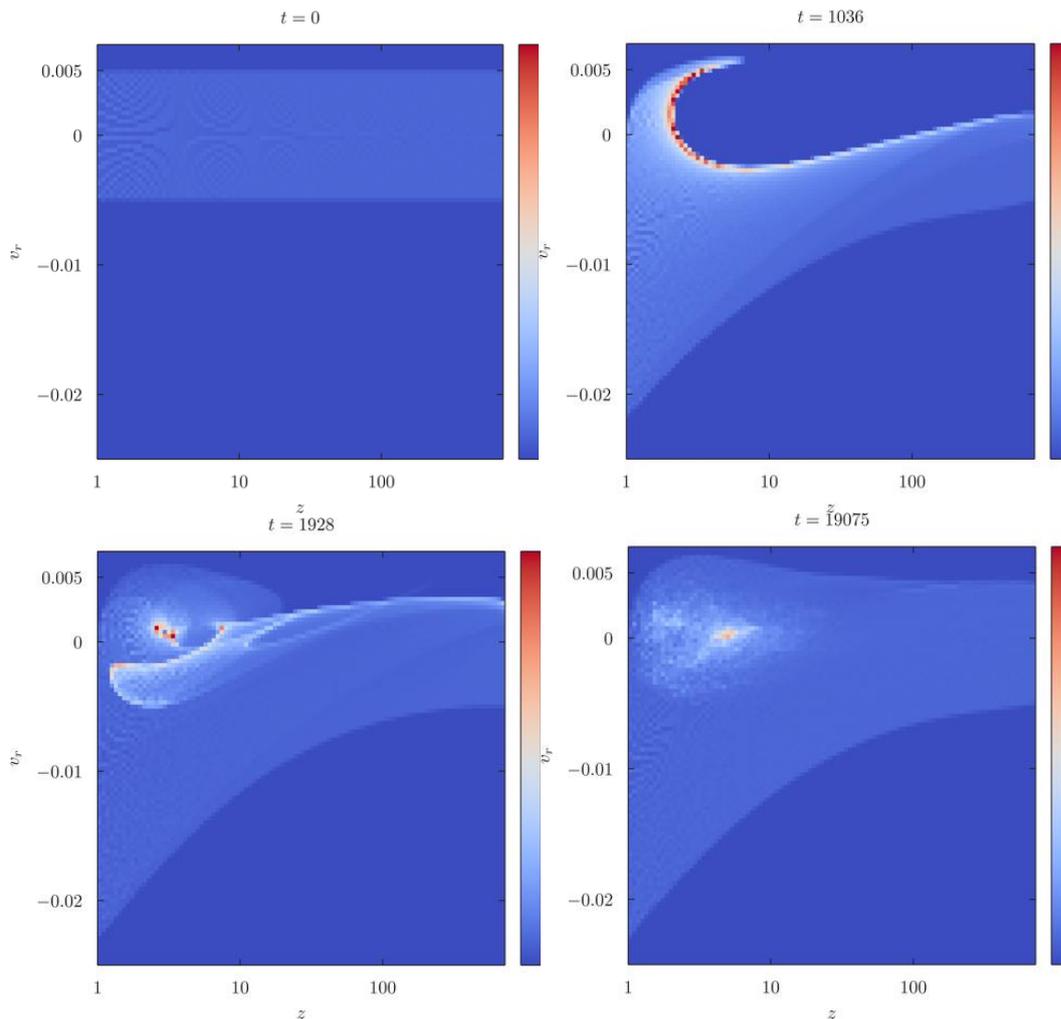


Рис. Плотность ионов в фазовом пространстве в различные моменты времени. Вдоль горизонтальной оси отложено радиальное расстояние в кубе. Вдоль вертикальной оси отложена радиальная скорость частиц. На малых расстояниях формируется плотный сгусток захваченных ионов. Облако захваченных частиц вносит значительный вклад в экранирование заряженной поглощающей сферы.

20. Дальнейшее развитие методов расчета самосогласованных электромагнитных полей при локальных возмущениях в магнитосфере Земли.

Концентрация захваченных частиц, пропорциональная трем четвертям электрического потенциала на малых расстояниях от внешнего точечного заряда, превышает концентрацию пролетных частиц, пропорциональную потенциалу в степени одна вторая, но меньше линейного возмущения плазмы. Такой скейлинг приводит к выводу о более слабом экранировании точечного заряда бесстолкновительной плазмой по сравнению с результатом линейного анализа, описываемого известной формулой Дебая. Учет облака захваченных частиц, игнорируемых в линейном приближении, очень важен для общей физической трактовки фундаментального явления - экранирования внешнего заряда плазмой

21. Анализ оптимальных условий прохождения внутренних гравитационных волн из тропосферы в ионосферу при наличии зональных ветров с генерацией в ионосферной плазме индикаторов кризисных процессов.

Рассмотрены специфические флуктуации фазы и амплитуды СДВ сигнала, которые коррелируют как в пространстве, так и во времени с прохождением цунами, зарегистрированных на станциях DART. Измерения на приемнике СДВ сигналов в Петропавловске-Камчатском и бухах в Тихом океане на больших расстояниях (Гавайи и Япония) от эпицентра землетрясения в Чили (27 февраля 2010 года) согласуются с гипотезой, что цунами генерируют атмосферные внутренние гравитационные волны, которые распространяются через нижнюю ионосферу.

22. Анализ данных наблюдений и механизмов транспорта облака продуктов взрыва ракеты в ионосфере.

Рассмотрены наблюдения посредством ионозонда и метеорного радара в обл. Соданкюла (SGO, 67°22'N, 26°38'E, Финляндия) 9 декабря 2009 года во время тестового запуска баллистической ракеты Булава. Из-за технических проблем ракета была разрушена около 07 UT на ионосферных высотах (вблизи 200 км) над Кольским полуостровом и на расстоянии около 500 км от обсерватории. Продукты взрыва ракеты распространились на большие расстояния и достигли зоны действия метеорного радара обсерватории через 2 часа (около 09 UT). Через 3 часа (около 10 UT) ионозонд обсерватории зарегистрировал спорадический слой, состоящий преимущественно из долгоживущих ионов (алюминий и его окислы). Обсуждены механизмы транспорта облака продуктов взрыва ракеты: 1) поскольку событие имело место в продолжении периода крайне низкой солнечной и магнитной активности, маловероятно, что ионосферные электрические поля играли существенную роль в транспорте продуктов взрыва и образовании спорадического слоя; 2) горизонтальный транспорт также не может быть связан с нейтральными ветрами; 3) оценки показывают, что транспорт мог быть обусловлен турбулентными движениями в термосфере.

23. Исследование аномального туннелирования электромагнитных волн через неоднородную плазму с мелкомасштабными структурами большой амплитуды на основе точно решаемых моделей с большими вариациями амплитуд волн и эффективной диэлектрической проницаемости

На основе точно решаемой одномерной модели рассмотрены варианты резонансного туннелирования электромагнитной волны через слой плазмы с мелкомасштабными неоднородностями, включая области непрозрачности, для которых использование приближенных методов некорректно. Рассмотрены сложные профили неоднородности плазмы, когда пространственный профиль неоднородности плазмы определяется рядом свободных параметров, определяющих, глубину модуляции диэлектрической проницаемости, характерные размеры структур плотности, их количество, толщину слоя неоднородной плазмы. Показано, что набор таких структур может быть весьма разнообразным при реализации безотражательного прохождения через слой падающей из вакуума волны - эффект просветления волнового барьера. При учете кубической нелинейности возможно точное решение одномерной задачи о нелинейном просветлении неоднородной плазмы, причем толщина областей непрозрачности существенно уменьшается. Задача о резонансном туннелировании электромагнитных волн через подобные барьеры представляет интерес для целого ряда практических приложений.

24. Анализ динамики и оптимальных условий для ультрарелятивистского серфотронного ускорения электронов и позитронов в космической плазме

**пакетами электромагнитных волн с плавной огибающей амплитуды.
Исследование структуры фазовой плоскости ускоряемых частиц.**

На основе численных расчетов нелинейного уравнения второго порядка для фазы волны на траектории частицы рассмотрена динамика серфотронного ускорения электронов и позитронов пакетом электромагнитных волн, распространяющимся поперек внешнего магнитного поля в космической плазме. Анализ показал, что для сильно релятивистских начальных значений продольной компоненты импульса частиц их захват в режим ультрарелятивистского ускорения происходит в заданном по величине интервале начальной фазы волны на траектории частицы $\delta\psi(0)$ сразу, если $0 < \delta\psi(0) \leq \pi$. В случае $-\pi \leq \delta\psi(0) \leq 0$ захват даже на больших временах расчета не наблюдался. Это позволит существенно упростить оценки затухания волны на ускоряемых частицах. При сильном ускорении компоненты скорости, импульса и релятивистского фактора частиц выходят на асимптотические значения, темп ускорения практически постоянен. На фазовой плоскости траектория накручивается на особую точку типа устойчивый фокус. После пересечения волнового пакета частица совершает ларморовское вращение. Результаты представляют интерес для развития современных представлений о возможных механизмах возникновения вариаций потоков ультрарелятивистских частиц в космической плазме.

25. Развитие моделей разрушения адиабатической инвариантности на резонансах и хаотизации динамики в нелинейных системах с быстрыми и медленными движениями. Анализ механизма возникновения хаотической динамики и направленного транспорта.

Исследован механизм разрушения адиабатической инвариантности за счет геометрических скачков адиабатического инварианта при переходах через сепаратрису в быстро-медленной гамильтоновой системе, моделирующей движение заряженной частицы в магнитосфере. Этот механизм приводит к гораздо более быстрому разрушению адиабатической инвариантности, чем рассматривавшиеся ранее диффузионные механизмы. Численным моделированием показано, что этот геометрический механизм приводит к росту темпа ускорения заряженных частиц в полях, типичных для некоторых областей магнитосфер звезд и планет. Проведен анализ устойчивости серфотронного ускорения релятивистских заряженных частиц электростатической волной в присутствии флуктуаций магнитного поля. Явление серфотронного ускорения основано на сохранении адиабатического инварианта частицы, захваченной в резонанс с волной. Показано, что быстрые флуктуации магнитного поля ведут к диффузионному разрушению адиабатической инвариантности и выходу частицы из режима серфотронного ускорения. Выведено соответствующее диффузионное уравнение, проведено сравнение его решений с результатами прямого численного моделирования динамики частиц.

26. Исследование вариантов динамики быстрых электронов в трехкомпонентной плазме грозных разрядов при внешних воздействиях.

При тормозном механизме излучения на частотах $\nu \gg 10$ МэВ вид спектров атмосферных гамма-всплесков ($J(\nu) \propto 1/\nu^\beta$) и спектров электронов с энергиями $E > \nu$ [$\Phi(E) \propto 1/E^\beta$] - одинаков. Наблюдаемые значения $\beta = 2,6 \div 4,1$ обусловлены зависимостью $\beta = \beta(d) = 3 + 1/d$ от коэффициента вариации энергии электронов d , подробнее этот вопрос изложен на сайте

http://plasma2014.cosmos.ru/sites/plasma2014.cosmos.ru/files/Abstract_Book_IKI_Plasma-2014.pdf, с.159, случай $\beta < 3$ - особый. Динамика параметров d и β , заданная при внешних воздействиях скоростью обмена энергией w (при $w < 0$ средняя энергия электронов

снижается, ее вариация $d \rightarrow \infty$, а $\beta \rightarrow 3$), зависит еще и от формы интегралов столкновений в линеаризованных кинетических уравнениях, т.е. от метода их нахождения. Был (на примере свободных и связанных электронов) выявлен критерий адекватности метода: диэлектрическая проницаемость, как фундаментальная характеристика среды, должна быть одинакова как для флуктуаций в плазме, так и для ее линейного отклика на внешнее воздействие.

27. Обобщение уравнений Града-Шафранова для замагниченной космической плазмы.

Выведены уравнения типа Града-Шафранова для замагниченной плазмы, для которых в случае, когда давления (вдоль магнитного поля и поперек) в статическом случае являются функциями только величины магнитного поля, допускают вариационную формулировку и существование свободной энергии. Данный подход используется для нахождения двумерных стационарных структур. Показано, что ниже порога зеркальной неустойчивости такие структуры имеют вид двумерного солитона для уравнения КП - так называемый ламп, который однако оказывается неустойчивым. Показано также, что при описании структур большой амплитуды нельзя пренебрегать эффектами конечного ларморовского радиуса.

Раздел Экспериментальные исследования. Руководитель чл.-корр. А.А. Петрукович

1. Механизм нагрева вспышечных лент

Выявлена сверхтонкая структура вспышечных лент во вспышке C2.1 и предложен механизм их нагрева. Ленты длиной 10000 км состояли из ярких ядер размером ~ 100 км (рис.). Наблюдения выполнены телескопом NST/BBSO в $\text{H}\alpha$ вблизи его дифракционного предела 70 км, примерно соответствующему длине свободного пробега фотона $\text{H}\alpha$ в хромосфере. Формирование вспышечных лент происходило без участия ускоренных частиц, так как УФ и $\text{H}\alpha$ излучение наблюдалось во вспышечной области задолго до появления жесткого рентгеновского излучения. $\text{H}\alpha$ ленты совпадали в пространстве с вертикальными электрическими токами на фотосфере. Эволюция токов показала, что механизмом нагрева лент может являться джоулев нагрев плазмы за счет диссипации токов.

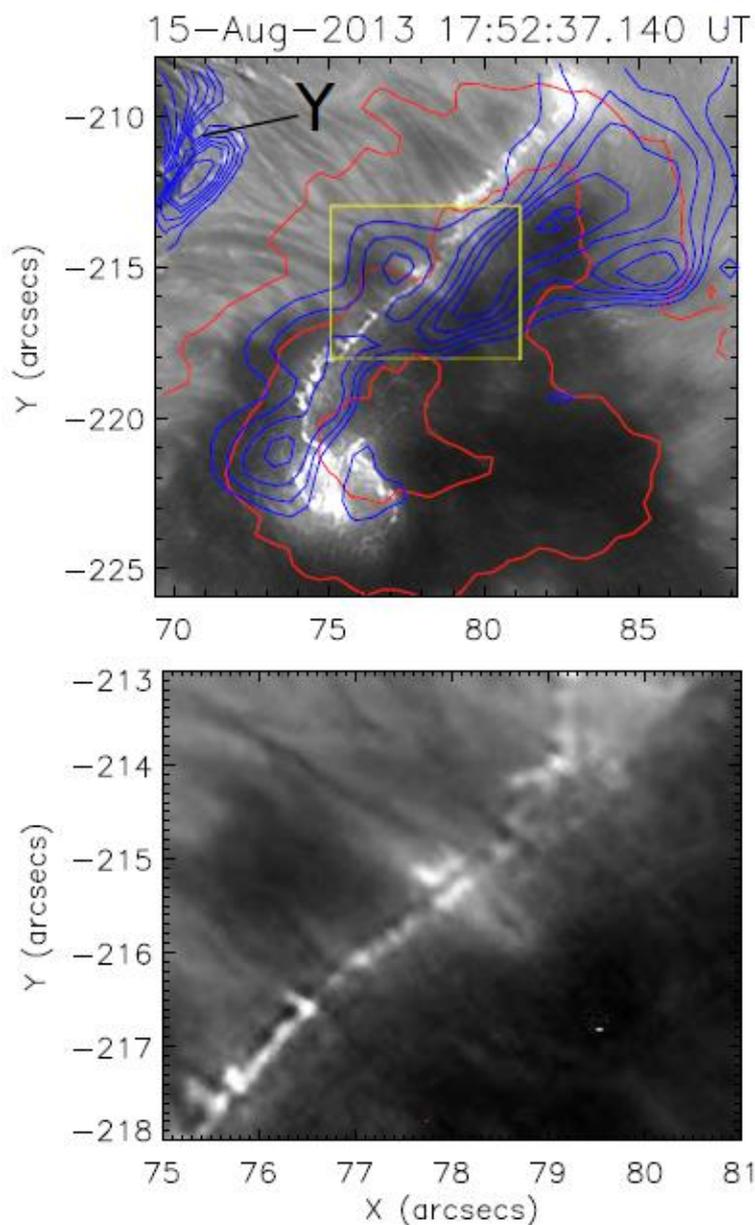


Рис. Изображение вспышечной ленты. Красные линии – изолинии магнитного поля. Синие линии – изолинии электрических токов.

2. Ускорение электронов в однопетлевой вспышке

Исследованы процессы ускорения электронов в неэруптивной однопетлевой вспышке C1.2 класса 12 августа 2002 г., а также соотношение между кинетической мощностью ускоренных электронов и нагревом плазмы с учетом радиационных потерь. Динамика тепловой плазмы и ускоренных электронов по данным RHESSI может быть объяснена в рамках стохастического ускорения электронов. Для количественной интерпретации наблюдений использовалась простая модель, в которой главным фактором препятствующим ускорению электронов являлись кулоновские столкновения с протонами окружающей плазмы. Вычисления показали завышенные потоки частиц в начале фазы ускорения по сравнению с тем, что мы оцениваем по жесткому рентгеновскому излучению. Предположительно обратный ток может служить причиной уменьшения потока низкоэнергичных электронов.

3. Изучение характера магнитного поля активных областей Солнца и его связи с их вспышечной продуктивностью

Получена функция Грина уравнения Лапласа внешней шаровой области для нахождения градиента скалярного потенциала магнитного поля с использованием граничного условия — производной потенциала по заданному направлению. Разработан набор программ, использующих данное решение для расчета силовых линий потенциального магнитного поля в активных областях Солнца по известным граничным данным — компоненте поля по лучу зрения на уровне фотосферы. Разработанные программы применены к 95 активным областям, наблюдавшимся аппаратами MDI/SOHO и TRACE, либо инструментами HMI/SDO и AIA/SDO. Восстановленные линии сравнивались с магнитоплазменными структурами (магнитными петлями), наблюдаемыми в диапазоне экстремального ультрафиолета. На основании сравнения сделан вывод о характере поля в каждой из областей (потенциальный, непотенциальный, промежуточный) и исследованы корреляции между характером поля областей и их вспышечной активностью.

4. Анализ вариаций интенсивности мягкого рентгеновского излучения Солнца.

Выполнен обзор по исследованию вариаций интенсивности мягкого рентгеновского излучения Солнца включая: исследование солнечных событий малой мощности по данным проектов INTERBALL, GOES, RHESSI; представлены новые данные по изучению структуры теплового фона солнечной короны по данным проекта RHESSI в диапазоне энергий от 2÷15 кэВ; по данным проекта “Интербол-Хвостовой зонд” выделен и обработан ряд периодов, в которых наблюдались солнечные события очень малой мощности в рентгеновском диапазоне излучения Солнца. Для энергий 2÷15 кэВ выделен класс солнечных событий (класс 0) с общим энерговыделением от 10^{25} до 10^{26} эрг. Обнаружено существование нижнего предела в распределении слабых солнечных вспышек по энергиям, причем процессы, происходящие в микровспышках, лежащих около данного предела имеют смешанный характер, т.е. являются комбинацией теплового и тормозного рентгеновского излучения. Получены кривые распределения числа микровспышек в зависимости от их мощности. По данным проекта RHESSI обнаружено падение интенсивности рентгеновского излучения солнечных событий и теплового фона короны в диапазоне энергий от 2÷15 кэВ. Предложен механизм нагрева солнечной короны.

5. Структуры постоянных и переменных магнитных полей около Луны и Ганимеда: сравнение двух типов взаимодействий спутников планет с межпланетной средой.

Первые измерения, проведенные на орбитах вблизи Луны, показали, что собственное глобальное дипольное магнитное поле у Луны отсутствует. Тем не менее еще в рамках американской программы Аполло была обнаружена естественная остаточная намагниченность образцов лунного грунта, привезенных на Землю, и аномальная намагниченность участков поверхности Луны (до нескольких сот нТ). Исследования, проведенные на космических аппаратах Кагуя и Чандраян, выявили аномально высокое отражение протонов солнечного ветра от поверхности Луны, в частности, от магнитных аномалий. Проведено исследование возможности образования разрывов или ударных волн над магнитными аномалиями Луны при взаимодействии магнитного поля аномалии с солнечным ветром. Оценивается доля частиц, отраженных от области аномалии, и

зависимость концентрации отраженных частиц от условий в солнечном ветре и величины магнитного поля аномалии.

6. Оценка зоны образования среднемасштабные вариации солнечного ветра.

В работе [Viall et al., Geophys. Res. Lett. V. 36. L23102. doi:10.1029/2009GL041191, 2009] на основе анализа данных космического аппарата (КА) WIND для события 14 февраля 1996 года было показано, что во время периодических (~30 мин) вариаций плотности протонов наблюдались периодические изменения в противофазе плотности альфа-частиц. На основании этих наблюдений был сделан вывод: «Для этого события вариации в противофазе содержания альфа-частиц позволяют уверенно предположить, что структуры с периодическими вариациями плотности в солнечном ветре образуются в солнечной короне». Принимая во внимание, что альфа-частицы движутся быстрее протонов, наблюдаемые вариации должны были образоваться на расстояниях не более 0.02 а.е. от точки наблюдения. Это хорошо согласуется с изменением наклона степенного спектра флуктуаций межпланетного магнитного поля: явления с периодами порядка десятков минут попадают в область периодов, которые определяются локальными процессами в межпланетной плазме, и в них «стирается память» об условиях в области образования на Солнце.

7. Выявление и анализ быстрых вариаций относительного содержания дважды ионизованных ионов гелия в солнечном ветре

Продолжался анализ быстрых (в диапазоне от нескольких минут до нескольких секунд) вариаций содержания ионов гелия при различных условиях в солнечном ветре. При этом наши измерения позволили рассматривать отдельно колебания плотности протонов и плотности ионов гелия.

По этим данным установлено, что такие быстрые вариации плотностей протонов и ионов гелия в солнечном ветре функционально не связаны и являются совершенно независимыми - изменения этих плотностей происходят как в фазе, так и в противофазе. Это обстоятельство может свидетельствовать о весьма малых (в масштабах Солнца) размерах «зерен» солнечной короны (порядка нескольких тысяч километров), отличающихся постоянством содержания ионов гелия в области формирования потоков солнечного ветра.

8. Исследования пространственной структуры аномалий горячего потока вблизи фронта околоземной ударной волны с целью выявления связи области выделения энергии и структуры конвекции.

Были рассмотрены пять аномалий горячего потока, зарегистрированных спутником Интербол-1 в 1996 году. Основными критериями для отбора было относительное длительное прохождение аномалии через область нахождения спутника, так чтобы при временном разрешении плазменного спектрометра СКА-1 в ~ 10 сек. были достаточно подробно зарегистрированы различные области внутри и вокруг аномалии. Были определены направления и скорости движения аномалии по ударной волне, проведён расчет электрических полей вблизи аномалии, рассмотрены собственные скорости плазмы в образовании в системе координат, связанной с нормалью к токовому слою и ударной волне в данной точке. Полученные результаты позволили выделить в каждой из пяти рассмотренных аномалий характерные области – ведущую, замыкающую и

промежуточную. При рассмотрении собственных скоростей плазмы в теле аномалии было сделано предположение о наличии конвекции плазмы в аномалиях, а также в распределениях собственных скоростей были обнаружены характерные особенности позволяющие различить два типа аномалий, которые также различаются по функции распределения ионов по скоростям и по степени термализации плазмы.

9. Изучение динамики плазменных структур при переходе из солнечного ветра в магнитослой.

Продолжался анализ модификации структур плазмы солнечного ветра при переходе через околосолнечную ударную волну, то есть при входе их в магнитослой.

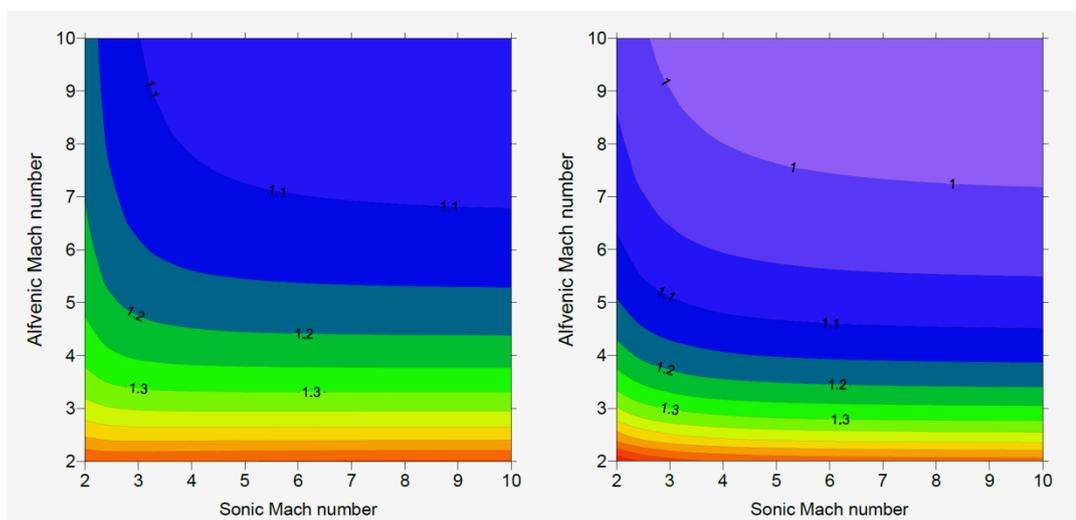
На большом статистическом материале было установлено, что плазменные структуры при переходе через околосолнечную ударную волну, как правило, увеличивают свои амплитуды и длительности фронтов. Структуры, наблюдающиеся на фоне больших значений плотности плазмы и модуля межпланетного магнитного поля, менее подвержены модификации при входе в магнитослой. На модификацию структур также существенно влияет величина угла между межпланетным магнитным полем и нормалью к околосолнечной ударной волне в точке входа плазмы в магнитослой, а также амплитуда этих структур.

10. Анализ вклада ММП в баланс давлений на магнитопаузе по ее наблюдениям спутниками ИНТЕРБОЛ и ПРОГНОЗ.

Проанализирован вклад натяжения и давления обволакивающих магнитопаузу силовых линий межпланетного магнитного поля в баланс давлений на этой границе. Показано, что влияние натяжения магнитных силовых линий в $\sim 2\Delta R$ раза слабей, чем влияние давления магнитного поля, где Δ - толщина магнитопаузы и R - радиус кривизны магнитных силовых линий. С учетом результатов трехмерного МГД моделирования и аналитических расчетов в Лагранжевом приближении получено аналитическое выражение для полного давления магнитного поля и плазмы P на подсолнечную часть магнитопаузы:

$$P = \rho V^2 \cdot \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left(\gamma - \frac{\gamma-1}{2M_s^2} \right)^{1/(1-\gamma)} \cdot \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6} \cdot \sin^2 \theta_{bv}}{M_a^2} \right)^{2/3} \right),$$

где ρV^2 - динамическое давление солнечного ветра, M_s и M_a звуковое и Альвеновское числа Маха в солнечном ветре, соответственно, θ_{bv} - угол между направлениями скорости солнечного ветра и ММП, и γ - показатель адиабаты. На рис. 1 показано качественное соответствие P , оцененного по вышеприведенной формуле (правая панель) и результатов расчетов в Лагранжевом приближении (левая панель).

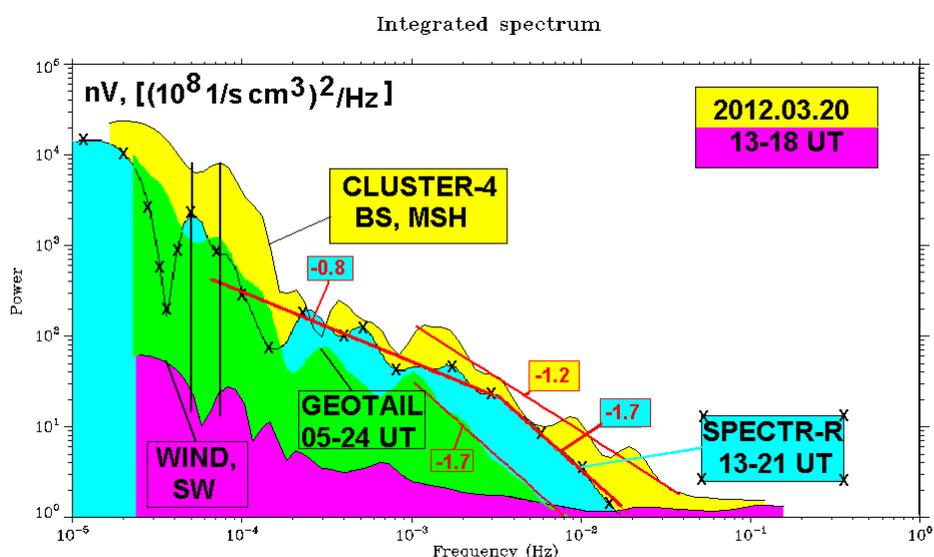


С учетом полученного выражения обновлена аналитическая модель геомагнитопаузы, описывающая результаты наблюдений этой границы спутниками Прогноз/Интербол.

11. Исследование развития квазирезонансных турбулентных каскадов на дневной и ночной границе магнитосферы

Впервые изучены каскады (дискретные и турбулентные) по данным потока ионов одновременно в солнечном ветре (WIND) на границе геомагнитного хвоста (GEOTAIL и СПЕКТР-Р), а также в форшоке и внешнем каспе (CLUSTER). Это позволило увидеть максимумы $\sim 0.03-0.07$ МГц усиленные на 2.5 порядка по сравнению с солнечным ветром. Обсуждается механизм усиления за счет резонансов границы геомагнитного хвоста. На 0.2-2 МГц наблюдаются мембранные и полостные моды, как и в динамическом давлении.

С увеличением частоты начинает формироваться непрерывный спектр с наклоном около «-1». Результаты нашего анализа могут быть применены для усовершенствования предсказаний космической погоды, а также для понимания природы турбулентных каскадов в разных средах, включая термоядерные установки. Материалы находятся в печати.



12. Моделирование и наблюдения низкочастотных баллонных мод в околоземной среде

Для создания интерпретационных моделей для космического проекта "Резонанс", проведены расчеты спектральных характеристик и пространственной структуры баллонных мод в рамках равновесной конфигурации, моделирующей неоднородную магнитосферную плазму конечного давления в криволинейном магнитном поле. Были рассчитаны дисперсионные соотношения и пороговые условия баллонной МГД неустойчивости в двухкомпонентной плазме при произвольных соотношениях между плотностями горячей и холодной компонент плазмы. Баллонные моды наблюдались на флотилии магнитосферных спутников в виде полоидальных геомагнитных Pc5 пульсаций диапазона.

13. Определение состояний пограничного плазменного слоя по параметрам ионных структур.

Результаты анализа плазменных популяций 0.1-20 кэВ по данным спутника ИНТЕРБОЛ-2 на $\sim 3.8-4.2 R_E$, где R_E - радиус Земли, выявили три основных типа состояния (режима) пограничного плазменного слоя (PSBL). Для первого типа характерно наличие диффузной ионной популяции (DIS – Diffuse Ion Structure). Средняя энергия протонов составляет $\sim 0.5-1.4$ кэВ. PSBL заполняется плазмой из мантии и/или долей геомагнитного хвоста. Второй тип имеет дисперсионную структуру энергия-широта (VDIS - Velocity Dispersed Ion Structure); средняя энергия протонов – $\sim 2.0-10.0$ кэВ. Наличие VDIS свидетельствует об ускорении ионных пучков (бимлетов) в нескольких выделенных резонансных областях токового слоя хвоста. Третий тип характеризуется 3-4 ионными энергодисперсионными инжекциями (с длительностью каждой из них 2-3 мин) со средней энергией $\sim 4.0-12.0$ кэВ (TDIS – Temporally Ion Dispersed Structure). Инжекции, вероятно, имеют временную природу. Третий тип состояния PSBL ассоциируется с развитием неустойчивостей и взрывных процессов в хвосте магнитосферы. Статистический анализ показывает (рис.), что число реализаций [N] того или иного режима PSBL находится в прямой корреляции с уровнем геомагнитной активности [AE-индекс].

Interball-2, 0247-2525 orbs., 355 structures DIS VDIS TDIS

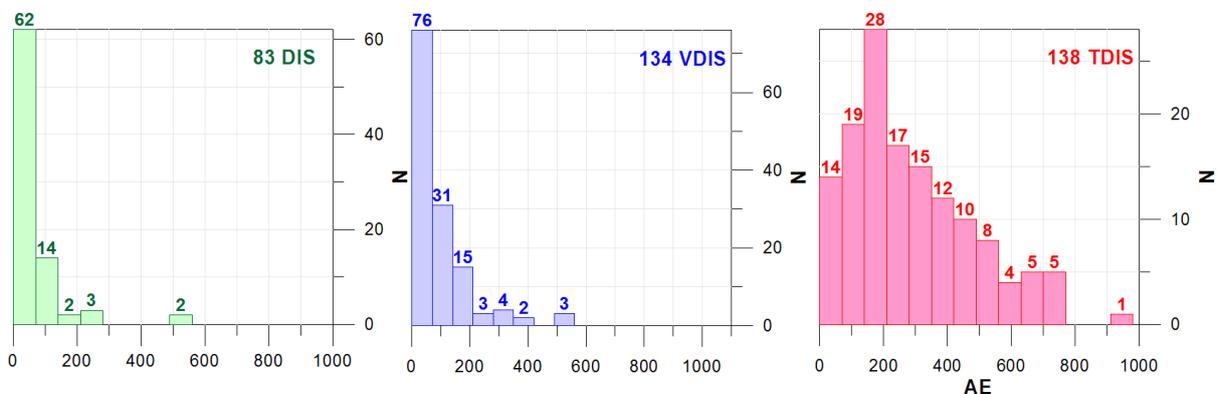


Рис. Зависимость числа реализаций для трех типов состояний PSBL от AE-индекса.

14. Обзор наблюдений токового слоя хвоста магнитосферы Земли.

Токовые слои --- один из основных типов динамических структур в плазменных системах с преобладанием теплового давления плазмы. Европейский многоспутниковый проект

Cluster позволил получить существенные новые данные по токовым слоям в хвосте магнитосферы Земли, в частности о величине электрических токов. Обсуждены методы измерений и обработки данных, их ограничения и возможности применения. В данном обзоре приведены результаты по определению носителей тока в токовых слоях, вертикальных профилей токовых слоев, сравнению наблюдений и моделей, по динамике токовых слоев в ходе суббурь. В заключение формулируются задачи, требующие решения в будущих проектах: детализация динамики электронов и двумерной структуры слоя.

15. Формирование квазиодномерного токового слоя в лабораторной и магнитосферной плазме

В работе проведен анализ процесса формирования двухмерного токового слоя в лабораторном эксперименте на установке ТС-3D. Изучена продольная и поперечная структура токового слоя, а также эволюция его конфигурации в процессе сжатия по направлению нормали к поверхности слоя. Структура токового слоя обладает рядом общих особенностей: безразмерный пространственный масштаб, распределение вдоль слоя нормальной к слою компоненты магнитного поля, зависимость амплитуды плотности тока от амплитуды нормальной компоненты магнитного поля. Так, из данных лабораторного моделирования следует, что формирование тонкого слоя на расстояниях $x \sim -15R_E$ в хвосте земной магнитосферы должно сопровождаться ростом амплитуды тангенциальной компоненты магнитного поля B_0 . При этом, B_0 растёт вдоль хвоста магнитосферы в направлении от Земли. Критическим значением амплитуды плотности тока в системе, по всей вероятности, является величина $j_0 = eN_e\sqrt{2T_i/m_i}$, где N_e - концентрация электронов, а $\sqrt{2T_i/m_i}$ - тепловая скорость ионов. Как следствие, толщина токового слоя не может быть существенно меньше ионного ларморовского радиуса или ионной инерционной длины.

16. Формирование высокоэнергичной популяции ионов в хвосте земной магнитосферы.

В рамках задачи исследован процесс формирования популяции высокоэнергичных ионов (энергии от 20 до 600 кэВ) в хвостовой области земной магнитосферы. Использована статистика наблюдений космического аппарата Interball-Tail за четыре года 1995-1998. Получены зависимости спектров высокоэнергичных ионов от параметров тепловой плазмы и амплитуд магнитного поля. Разработана аналитическая модель ускорения частиц до наблюдаемых энергий в процессе взаимодействия с транзитными всплесками электрического поля. Показано, что модель описывает основные характеристики наблюдений.

17. Изучение анизотропии электронной температуры в хвосте магнитосферы Земли.

Исследовано распределение электронной анизотропии в хвосте земной магнитосферы по данным наблюдений спутниковой миссии Cluster в период с 2001 по 2009 гг. Основное внимание уделено популяции анизотропных электронов с доминированием параллельной температуры и энергиями больше 100 эВ. Показано, что данная популяция в центральной области хвоста земной магнитосфер занимает энергетический диапазон до 20 кэВ, в то время как на флангах и в ближнем хвосте данная популяция занимает энергетический диапазон до 1-3 кэВ. Популяция анизотропных электронов растёт с ростом Bz

компоненты магнитного поля, однако нет никакой зависимости данной популяции от скорости потоков ионов. Предложена простая модель пич-углового и энергетического распределений электронов в хвосте магнитосферы.

18. Развитие колебательного торможения быстрых потоков в хвосте магнитосферы.

Наблюдения проекта THEMIS выявили затухающие колебания скорости быстрых потоков плазмы при их остановке вблизи Земли одновременно с наблюдаемыми Pi2 пульсациями в сопряженной точке на Земле. Частота пульсаций в два раза больше, чем в космосе. Частота колебаний потока также падает при удалении от Земли. Данная динамика создает волнообразную структуру накапливающегося магнитного потока около Земли, приводящую к схожей периодичности в полярных сияниях. Подобные наблюдения позволяют уточнить физические механизмы магнитосферно-ионосферных связей.

19. Выяснение роли токов, создаваемых неадиабатическими ионами, в усилении шировой компоненты магнитного поля в токовых слоях

Статистически подтверждена доминирующая роль токов, создаваемых неадиабатическими ионами, в усилении шировой компоненты магнитного поля в токовом слое геомагнитного хвоста.

На основе статистического анализа 17 интервалов пересечения токового слоя хвоста магнитосферы спутниковым квартетом Cluster подтвержден факт наличия асимметрии север-юг в отражении/преломлении траекторий неадиабатических ионов при их взаимодействии со слоем. Возникающая в результате данной асимметрии система противоположно направленных токов, текущих в северной и южной частях плазменного слоя хвоста (вне токового слоя) способствует усилению магнитного шира в центре токового слоя (см. Рис.).

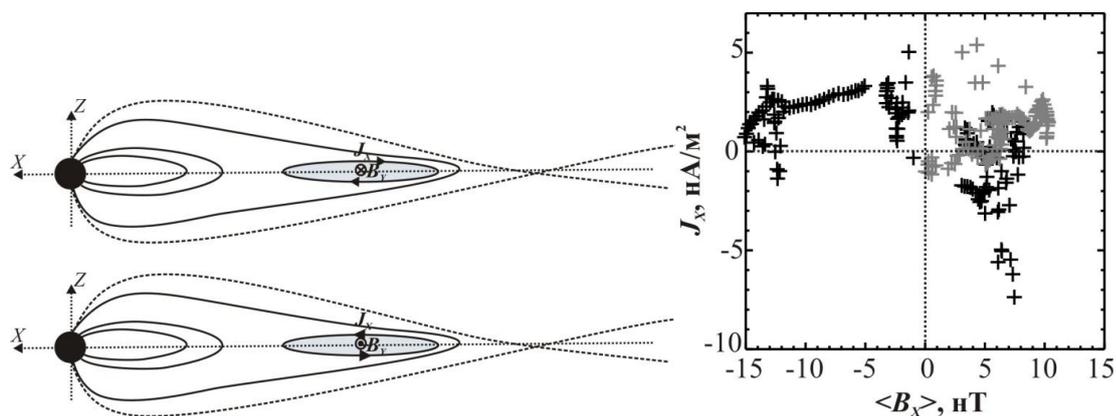


Рис. Слева: две конфигурации противоположно направленных токов J_x , текущих в северной и южной частях плазменного слоя, и ответственных за усиление ширового магнитного поля B_y данного знака вблизи нейтральной плоскости токового слоя (область токового слоя показана голубым цветом). Справа: статистическое распределение значений токов J_x , наблюдаемых в 17 интервалах пересечений токового и плазменного слоя спутниками Cluster, в северной части плазменного слоя ($\langle B_x \rangle > 0$) и в южной части плазменного слоя ($\langle B_x \rangle < 0$) в периоды наблюдения в токовом слое $B_y > 0$ (серые крестики) и в периоды наблюдения $B_y < 0$ (черные крестики).

20. Обзор по моделированию динамики и наблюдениям тяжелых ионов в магнитосфере Земли.

Написан обзор о роли тяжелых ионов в магнитосфере Земли, что необходимо для исследования магнитосферных процессов и плазменных неустойчивостей. Показано, что тяжелые ионы, в частности, кислорода O^+ , влияют на структуру токового слоя, скорость пересоединения и образование неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Их присутствие является важным фактором глобальной магнитосферной динамики, в которой участвуют кольцевой ток и радиационные пояса. Рассмотрены последние достижения в области наблюдений, на примере миссии Cluster, и в области моделирования циркуляции тяжелых ионов в магнитосфере. Показано, что процессы ускорения и транспорта тяжелых ионов в магнитосфере могут менять свойства хвоста магнитосферы, динамику кольцевого тока и радиационных поясов. Проанализированы вопросы возврата энергии в магнитосферу, а также вопрос о влиянии кольцевого тока на потери ионов из магнитосферы.

21. Анализ эффективности ускорения ионов разных масс при формировании ближней X-линии в токовом слое хвоста

На основе анализа 30 интервалов наблюдения спутниками Cluster ближней X-линии, находящейся в токовом слое геомагнитного хвоста на расстояниях от Земли $X > -19 R_E$, статистически исследована возможность ускорения ионов разных масс (H^+ , He^+ , O^+) в ближней окрестности X-линии. Установлен факт возрастания потоков энергичных ионов (с энергиями более 100 кэВ) в области, где наблюдалась магнитная турбулентность и серия мелкомасштабных плазмоидов. Также установлено, что наиболее эффективное ускорение (наиболее жесткий спектр) наблюдался для тяжелых ионов (O^+) по сравнению с более легкими ионами (H^+ , He^+). При этом ионы O^+ наиболее эффективно ускорялись в тех областях, где частота, соответствующая максимальной спектральной мощности магнитной турбулентности была близка к гирочастоте ионов O^+ . Данный результат указывает на то, что существенную роль в ускорении ионов O^+ играет резонансный механизм их взаимодействия с низкочастотной турбулентностью.

22. Модель распределения давления в магнитосфере Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до $12R_E$ в магнитоспокойных условиях

Создана эмпирическая модель распределения давления в магнитосфере Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до $12R_E$ в магнитоспокойных условиях. Модель основана на результатах работы миссии THEMIS в течение 5 лет. Анализировались спектры электронов и ионов в широком диапазоне энергий и питч углов. Вычислялись диагональные компоненты тензора давления вдоль траекторий полета 5 космических аппаратов и определялось усредненное распределение давления вблизи экваториальной плоскости. Входными параметрами модели являются динамическое давление солнечного ветра, величина и ориентация межпланетного магнитного поля ($0.5 < P_{dyn} < 2.1$ нПа, -3.5 нТл $< B_z < 3.5$ нТл). Модель размещена на сайте ИКИ по адресу: <http://stdad.iki.rssi.ru/pressuremodel/pressure.php>

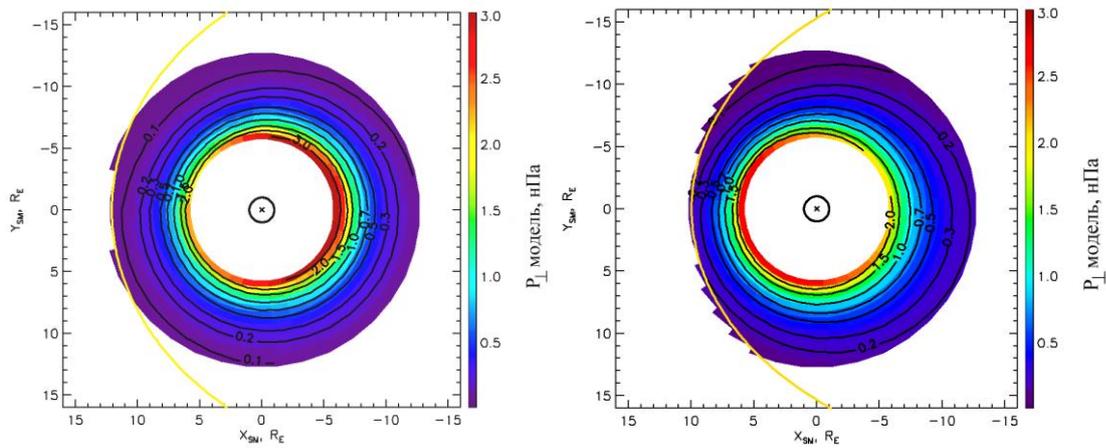


Рис. Распределение давления в экваториальной плоскости при различные значения динамического давления солнечного ветра и ММП: слева - $P_{dyn} = 0.7$ нПа, $B_z = 3$ нТл, справа - $P_{dyn} = 1.9$ нПа, $B_z = -3$ нТл

23. Определение величины плазменного параметра в областях минимального значений магнитного поля на геоцентрических расстояниях до $12R_E$.

Определено распределение плазменного параметра, равного отношению давления плазмы к давлению магнитного поля. Построена картина распределения плазменного параметра. Показано, что в ночные часы на рассматриваемых геоцентрических расстояниях плазменный параметр превышает единицу (рис. а). Учтен сдвиг минимумов магнитного поля в дневные часы от плоскости экватора. Для определения значения плазменного параметра в области минимумов магнитного поля использована модель Цыганенко-2001. Показано, что в минимумах магнитного поля величина плазменного параметра может превышать единицу (рис. б).

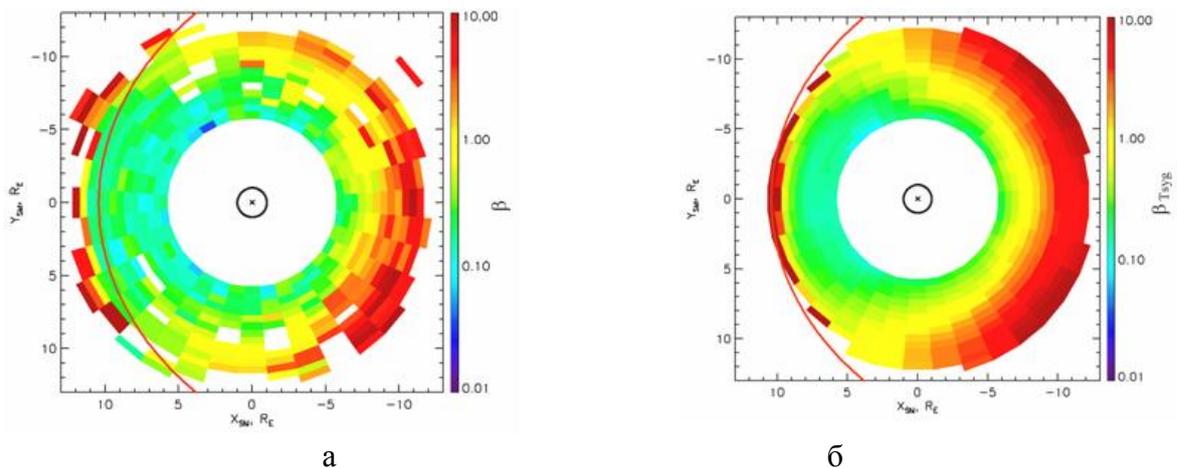


Рис. Распределение плазменного параметра в экваториальной плоскости (а) и в области минимумов магнитного поля в проекции на экваториальную плоскость (б) [Antonova et al., 2011].

24. Проецирование аврального овала на экваториальную плоскость

Проведено сравнение величин давления плазмы, измеренных в экваториальной плоскости и на низких высотах. Давление плазмы получено при обработке и анализе эксперимента THEMIS. Давление на малых высотах при обработке и анализе данных авральных

спутников DMSP на высоте ~ 800 км. Учтено, что в условиях магнитоэлектростатического равновесия давление плазмы постоянно на магнитной силовой линии, что позволяет проводить проецирование с малых высот на экваториальную плоскость и с экваториальной плоскости на малые высоты не используя какую-либо модель магнитного поля. Анализ давления плазмы в области дискретного аврорального овала показал, что величины давления значительно превышают величины давления в плазменном слое (см. рис.) и соответствуют величинам давления в окружающем Землю плазменном кольце. В результате получила объяснения хорошо известная кольцевая форма аврорального овала.

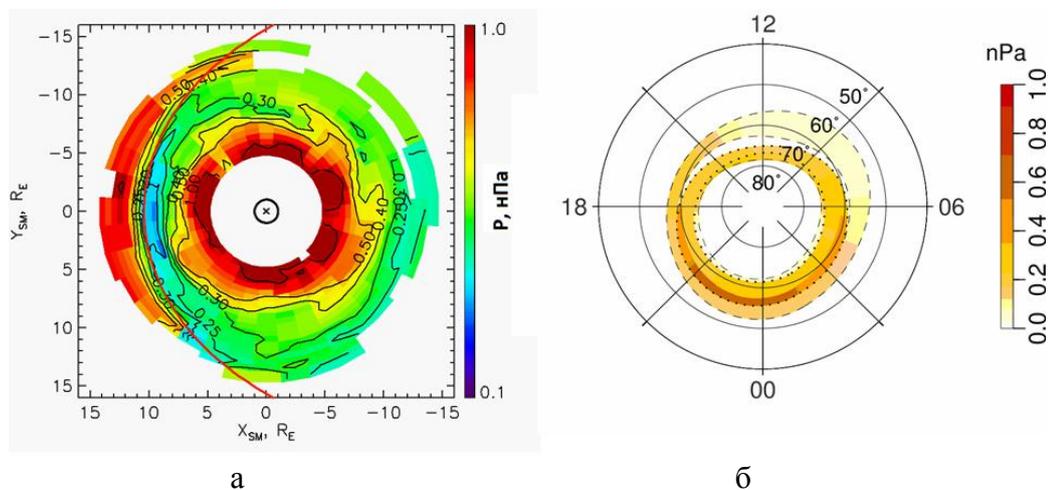


Рис. Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости в окружающем Землю плазменном кольце (а) и на малых высотах (б). Зелеными точками выделено положение аврорального овала [Антонова и др., 2014].

25. Генерация системы продольных токов при асимметрии давления плазмы

Промоделированы искажения магнитного поля диполя асимметричным по долготе распределением давления и определены возникающие продольные токи. В ходе моделирования воспроизведено возникновение ям магнитного поля. Показано, что дополнительно к токам, соответствующим по величине и знаку токам зоны 2 Иджимы и Потемры, на больших геоцентрических расстояниях возникает система токов, по знаку соответствующих токам зоны 1 (см. рис). В отличие от реальных продольных токов, полученные при моделировании токи не описывают ситуацию, при которой токи зоны 1 должны примерно в 2 раза превышать токи зоны 2. Однако получен результат только для искаженного поля диполя. В реальной токовой геометрии образование токов типа зоны 1 внутри магнитосферы за счет изменений направления радиального градиента объема магнитной силовой трубки проливает новый свет на проблему формирования крупномасштабной магнитосферной конвекции.

Проведен предварительный анализ результатов наблюдений ям магнитного поля в эксперименте AMPTE/CSE.

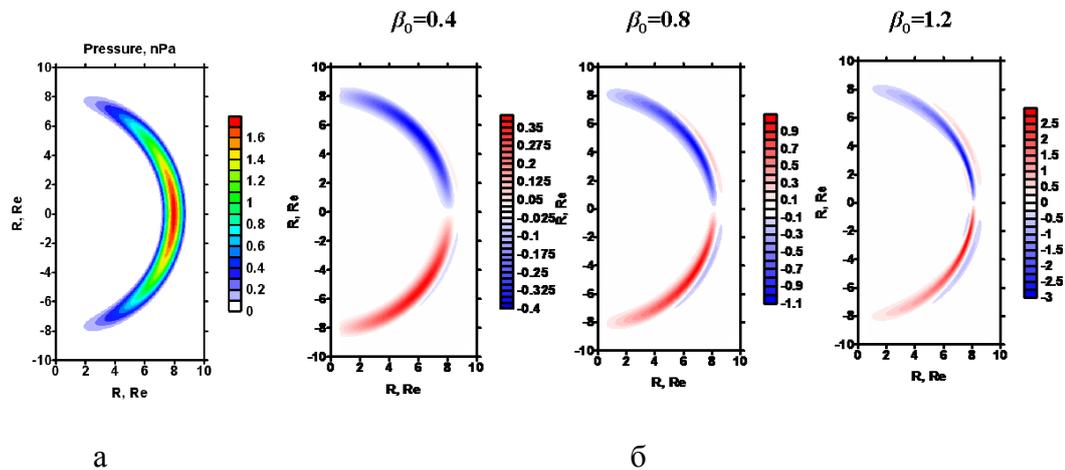
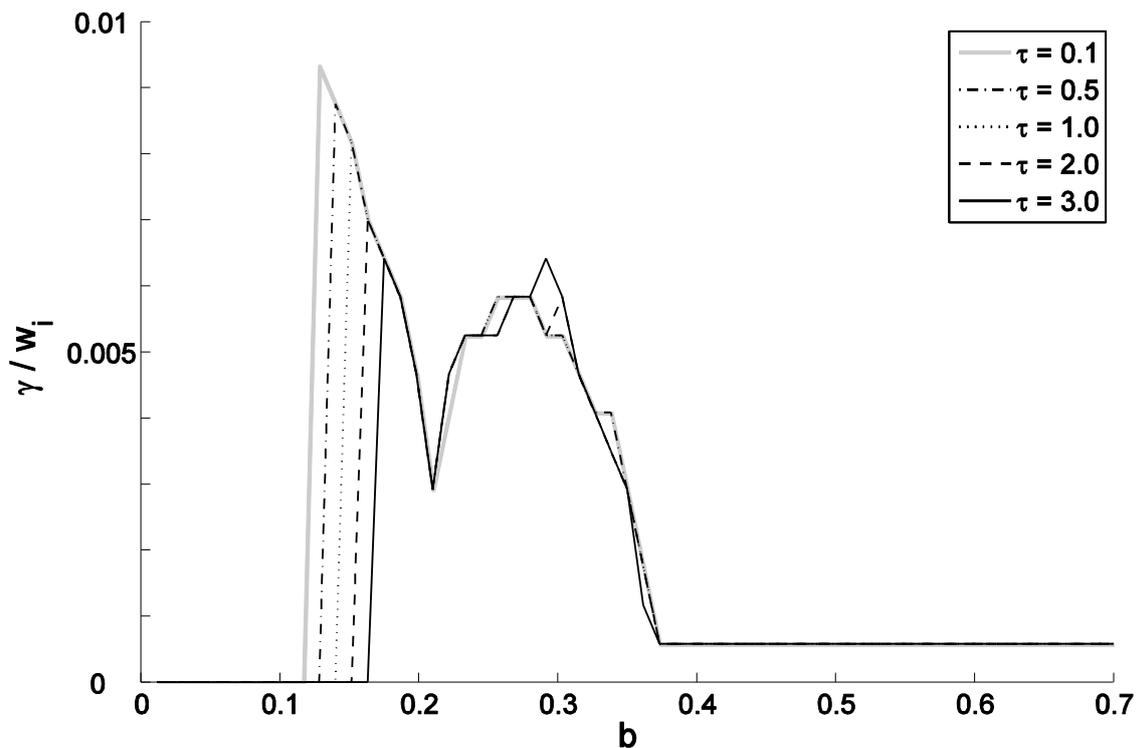


Рис. Исходная картина распределения давления в экваториальной плоскости (а) и плотность продольных токов (б) полученная в ходе нелинейного моделирования искажения поля диполя.

26. Возбуждение широкополосного шума неоднородностями концентрации и электрического поля.

Широкополосный электростатический шум регулярно регистрируется на авроральных магнитных силовых линиях. Теория электростатических ионно-циклотронных волн в плазме является наиболее подходящей для его интерпретации. Неоднородные локализованные электрические поля и неоднородности концентрации плазмы могут дестабилизировать другую разновидность электростатических ионно-циклотронных волн.

Проанализировано нелокальное дисперсионное уравнение для данного типа волн и показано, что оно имеет неустойчивые решения для широкого набора частот и волновых чисел. Для развития такого рода неустойчивости необходимы локализованные неоднородные электрические поля и/или неоднородности концентрации плазмы. Впервые продемонстрировано, что неоднородности плотности плазмы могут возбуждать такого рода неустойчивости даже в отсутствие неоднородных электрических полей.



Инкремент неустойчивости в присутствии неоднородностей электрического поля и концентрации плазмы, нормированный на гирочастоту иона O^+ в зависимости от параметра $b = (k_y \rho_i)^2 / 2$. Параметры плазмы: $\omega_r = 0.98\Omega_i$, $\rho = 10$ метров, $V_d = 0.1v_{te}$. Отношение продольной составляющей волнового вектора к поперечной постоянно и равно $u = k_z / k_y = 0.1$, варьируется значение $\tau = T_i / T_e$: сплошная серая линия соответствует $\tau = 0.1$, штрих-пунктирная линия - $\tau = 0.5$, пунктирная линия - $\tau = 1.0$, штриховая линия - $\tau = 2.0$, сплошная жирная линия - $\tau = 3.0$.

27. Разогрев ионов на полярной границе авроральной области

Используя прямые измерения потоков частиц и электромагнитных волн на спутнике ИНТЕРБОЛ-2, полученные во время умеренных геомагнитных возмущений, определен механизм разогрева ионов. Показано, что величина разогрева зависит от времени воздействия и составляет ~ 80 эВ/с. В результате такого разогрева среднее значение энергии ионов достигает нескольких кэВ и пропорционально dV/dt . Отсюда следует, что при перемещении границы авроральной области происходит генерация электрического поля, которое приводит к разогреву ионов.

02.02.1997

$$\ln(E) = 0.2 * \Delta t - 1.7$$

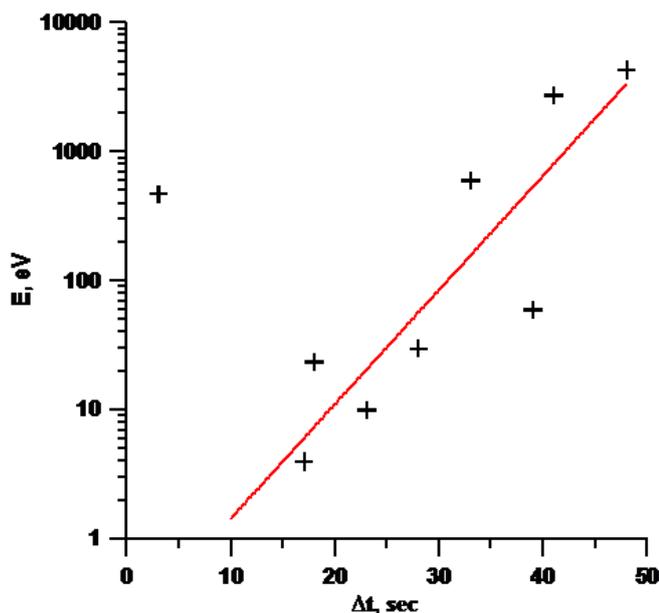


Рис. Зависимость энергии разогрева ионов от «сдвига» по времени.

28. Анализ вклада MLT и N/S эффектов в распределение концентрации плазмосферной плазмы.

На основе экспериментальных данных, полученных в 1995-2000 г. на космическом аппарате Интербол-1 с помощью прибора АЛЬФА-3, и построенной на их основе полуэмпирической двумерной модели плазмосферы Земли проанализировано распределение температуры и плотности протонов в плазмосфере Земли. Было продемонстрировано, что распределение плазмы вдоль магнитных силовых линий может иметь минимум, смещенный относительно экватора. Существенно различается распределение плотности и температуры протонов во внутренней ($L < 3$) и внешней ($L > 3$) плазмосфере Земли: во внешней плазмосфере параметры плазмы не зависят от местного магнитного времени, тогда как во внутренней области плотность и температура протонов понижены в ночные часы и, возможно, плотность плазмы повышена в вечерние часы. Показано также, что температура в плазмосфере определяется освещенностью ионосферы в ближайшем основании силовой линии и не зависит от освещенности противоположного полушария.

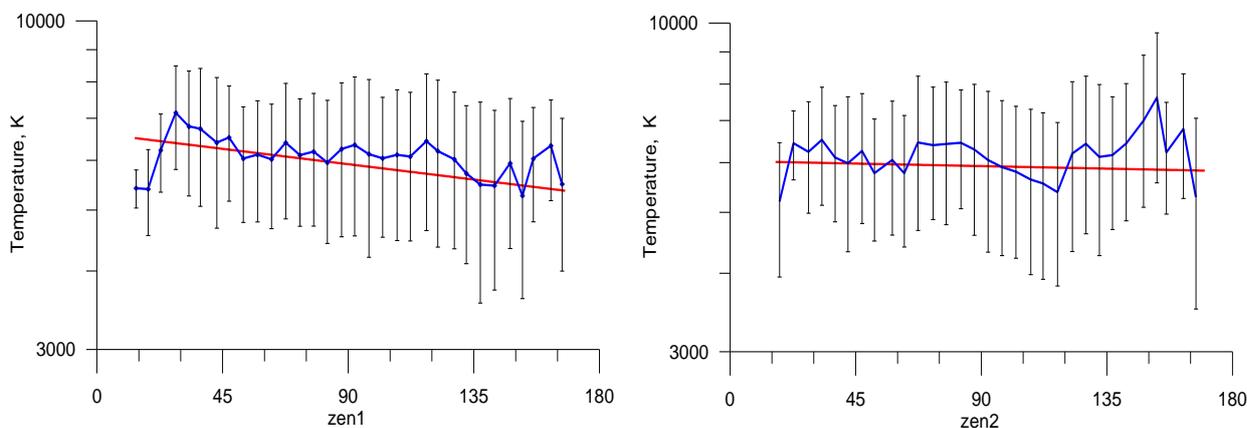


Рис. Зависимость средней температуры протонов в плазмосфере от зенитного угла основания силовой линии в ионосфере на высоте 200 км (zen1 – зенитный угол основания силовой линии ближайшего к точке измерения, zen2 – зенитный угол основания силовой линии в другой полусфере Земли).

29. Первые экспериментальные наблюдения ионосферно-отраженных протонных свистов по многокомпонентным волновым измерениям спутника DEMETER.

Представлены экспериментальные наблюдения и детальное исследование различных видов протонных свистов, включая транс-экваториальные и ионосферно-отраженные протонные свисты. Наблюдение последних было выполнено впервые. Исследование основано на шестикомпонентных волновых данных спутника DEMETER в КНЧ диапазоне частот, которые позволяют получить спектрограммы, на которых представлены не только спектральная плотность энергии волн, но также такие волновые характеристики как поляризация, угол волновой нормали, показатель преломления и вектор Пойнтинга. Объяснение различных видов протонных свистов основано на свойствах распространения ионно-циклотронных волн в многокомпонентной плазме, при котором возможно отражение на межсионном гибридном резонансе. Анализ экспериментальных данных дополнен численным моделированием спектрограмм, которое воспроизводит основные особенности наблюдаемого явления.

30. Экспериментальная оценка области засветки в волноводе земля-ионосфера одним молниевым разрядом.

Получены убедительные экспериментальные доказательства того, что область, которую «засвечивает» один молниевый разряд в волноводе земля-ионосфера, может располагаться в обоих полушариях, занимая в каждом более 2000 км вдоль меридиана. Этот результат важен для понимания природы протонных свистов, а также для исследований, связанных с распространением и взаимодействием с частицами электронных свистов в магнитосфере.

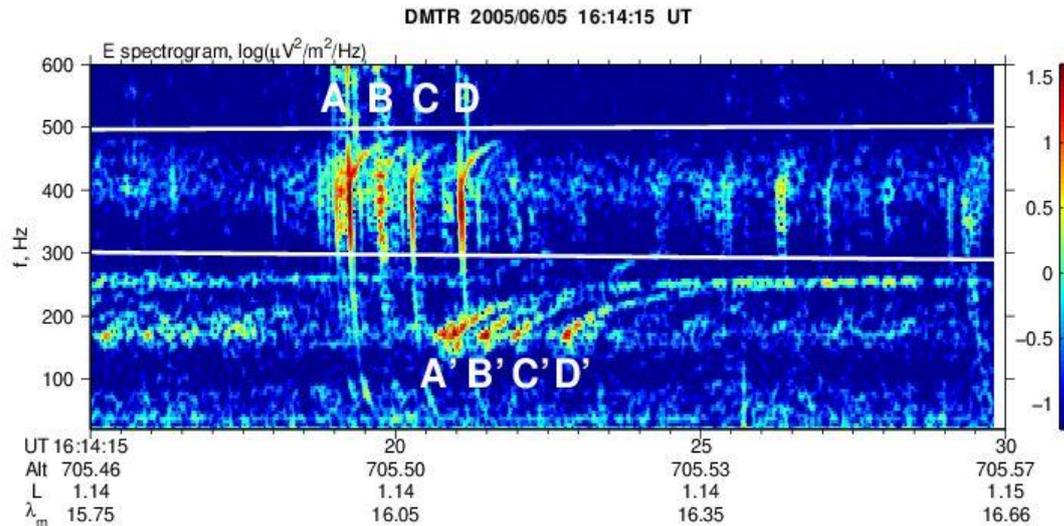


Рис. Четыре пары протонных свистов.

Источником каждой из четырех пар сигналов является один и тот же молниевый разряд, однако эти сигналы приходят на спутник из двух магнитосопреженных областей, расположенных в различных полушариях.

31. Анализ периодов квазипериодических ОНЧ излучений на различных временных масштабах.

Исследованы свойства квазипериодических (QP) ОНЧ излучений, зарегистрированных 24 декабря 2011 на высокоширотной станции в Северной Финляндии. Основное внимание уделено анализу характерных периодов в спектрах QP излучений на различных временных интервалах и их динамике во время рассматриваемого события. На больших интервалах порядка 1-10 минут выделены два типа поведения периодов QP излучений: плавное увеличение от 1 до 2.5 минут, и значительные вариации в диапазоне 2-10 минут, связанные с суббуриями. Выявленные вариации периодов QP ОНЧ излучений объясняются на основе свойств автоколебательного режима электронной циклотронной неустойчивости в магнитосфере. В интервале малых временных масштабов, порядка единиц секунд, выявлена регулярная модуляция в QP элементах, период которой совпадает со временем двухскачкового распространения свистящих атмосфериков. Этот факт указывает на то, что QP ОНЧ излучения распространяются канализированным (дактированным) способом. Дактированное распространение и сохранение формы растущих по частоте дискретных сигналов внутри QP элементов показывает, что QP излучения генерировались в режиме пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном лазере.

32. УНЧ-КНЧ излучения в верхней ионосфере от грозовых разрядов по данным микроспутника Чибис-М

Анализ данных электрического датчика микро-спутника Чибис-М доказал наличие в верхней ионосфере низкочастотных электромагнитных структур, возбуждаемых атмосферной грозовой активностью: ионосферного альвеновского резонатора (частоты от ~ 0.5 Гц до ~ 5 Гц) и шумановского резонанса (частоты ~ 8 Гц и гармоники). Спутниковые

результаты согласуются с оценками по разработанной численной модели электромагнитного отклика атмосферы и ионосферы на молниевый разряд.

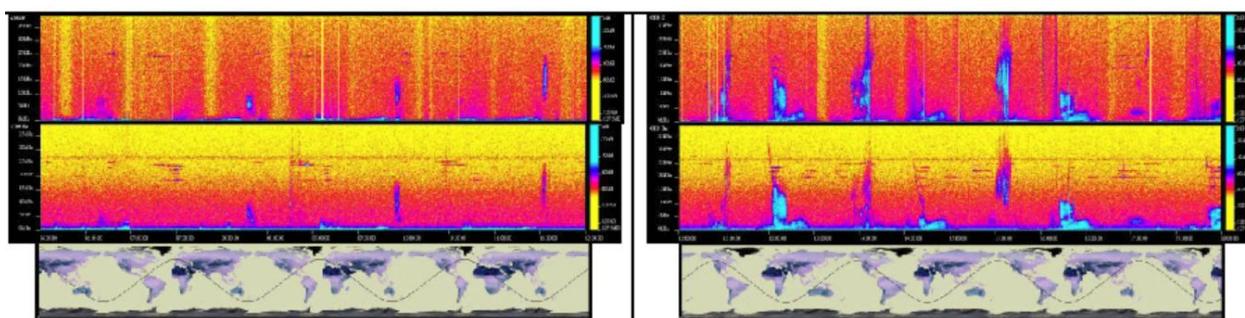
33. Воздействие МГД волн на ионосферу

Впервые обнаружены эффекты модуляции полного электронного содержания ионосферы, определяемого по сигналам глобальной спутниковой навигационной системы GPS, УНЧ магнитосферными волнами (диапазон Pc5). Обнаружена периодическая модуляция интегральной проводимости ионосферы геомагнитными Pc5 пульсациями по данным одновременных измерений УНЧ волн радаром и магнитометрами. Разработана теоретическая модель взаимодействия МГД волн с системой ионосфера - атмосфера - земля, опираясь на которую количественно проинтерпретированы эти эффекты. Основываясь на этой модели, показана принципиальная возможность проводить магнитотеллурическое зондирование планетной проводимости с борта низкоорбитального зонда.

34. Разработка методов обеспечения высокой чувствительности бортовых измерительных приборов и служебных средств при измерениях электромагнитных параметров космической плазмы.

Измерение электрической компоненты плазменных излучений является сложной методической задачей, что подтверждается малым количеством успешных экспериментов на космических аппаратах. Используя положительный опыт предшествующих, экспериментов по методу комбинированной волновой диагностики, на микроспутнике «Чибис-М» установлены два комбинированных волновых зонда (КВ31, КВ32) и индукционный магнитометр (ИМ), для измерения КНЧ-ОНЧ излучений: электрической компоненты (двойной зонд КВ31 и КВ32); 3-х магнитных компонент (КВ31, КВ32, ИМ). Далее сигналы процессором спектрального анализа (ПСА), либо в режиме «волновая форма» оцифровываются, либо в режиме «мониторинг» подвергаются FFT, и затем передаются по телеметрическим каналам. Важным методическим аспектом является обеспечение динамического диапазона измерений ~ 120 дБ.

В режиме «мониторинг» типичные и регулярно наблюдаемые в течение ~30 месяцев данные свидетельствуют, что начало и развитие суббури Кр >5 (рис.) проявляется на субавроральных широтах синхронно по E и V излучениям растущим от орбиты к орбите по частоте и интенсивности. Наличие обеих компонент свидетельствует об электромагнитной природе излучений. Данные полученные в геомагнитно спокойные периоды свидетельствуют о достаточно низком уровне фона по обоим компонентам.



а).

б).

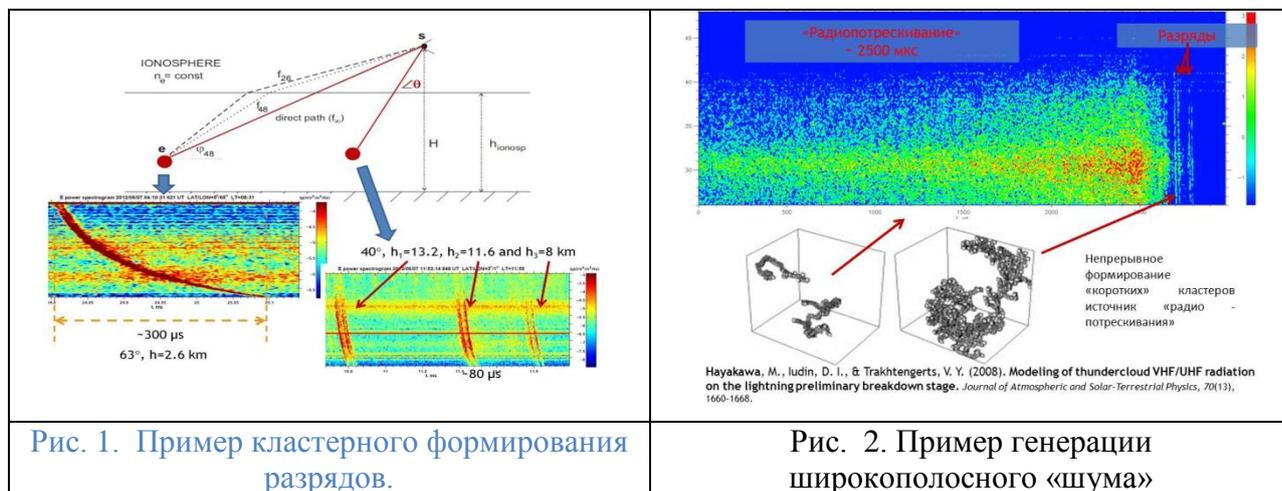
Рис. Данные МВК длительностью 6 часов. По оси X – время UT+3. а). 2012.04.01, начало 06:00:11 – конец 12:00:11; б). 2012.10.13, начало 12:00:02 - конец 18:00:02.

Расположение панелей сверху вниз: $CH0 E$ – электрическая компонента; $CH5 Bz$ – магнитная компонента; проекция орбиты на земную поверхность. Для E и Bz ось Y – шкала частот 0.001-40 кГц, цвет – интенсивность 120 дВ.

35. Экспериментальное исследование природы высотных молний и сопутствующих им процессов в атмосфере и ионосфере Земли на микроспутнике «Чибис-М» и в проекте РЭЛЕК

Впервые на микроспутнике «Чибис-М» проведены на высотах 250 – 500 км комплексные исследования УФ и ИК излучений, гамма квантов, УКВ и КНЧ/ОНЧ излучений в грозовых образованиях. На данном этапе ряд характерных явлений изучен только благодаря измерениям волновой формы сигналов. В проекте РЭЛЕК к настоящему времени реализованы только мониторинговые измерения, имеющие временное разрешение около 20 сек, не коррелирующее с «Чибис-М».

По данным УКВ анализатора (диапазон измерений 26-48 МГц) «Чибис-М» отмечено два типа сценария развития высотного разряда. Отличительной чертой сценария развития «пробоя» являются парные широкополосные импульсы длительностью нескольких микросекунд и задержкой между импульсами 6-120 мкс. Это подтверждает гипотезу о том, что второй импульс является отражением исходного от поверхности Земли и позволяет определить высоту источника (рис. 1). В некоторых случаях события сопровождаются ИК и УФ излучением. Наиболее активные районы сценария на поверхности Земли: Центральная Америка, западное побережье Африки и Малайский архипелаг.



Второй сценарий развития молниевой активности заключается в генерации широкополосного «шума» длительностью от сотен мкс. до нескольких мкс. и, в большинстве случаев, сопровождается УКВ всплесками. Амплитудный спектр этого «шума» говорит о возможной «кластеризации» излучателей.

36. Исследования атмосферной эмиссии в диапазоне мягкого рентгеновского излучения по данным эксперимента РПС-1 на ИСЗ "Коронас-Ф" и других наблюдений, возможных механизмов возникновения сезонных вариаций. Исследование параметров кратковременных всплесков потоков электронов с энергиями более 80 кэВ на низких широтах в околоземном пространстве.

Продолжено исследование природы атмосферной эмиссии в диапазоне мягкого (3-10 кэВ) рентгеновского излучения, впервые зарегистрированного спектрометром РПС-1 в

эксперименте на ИСЗ "Коронас-Ф" на ночной стороне атмосферы. Соответствующая атмосферная светимость изменяется в пределах от 10 Вт до 40 кВт в зависимости от времени и географического положения (для сравнения: светимость полярных сияний составляет 10-30 МВт). Разрабатывается численная модель генерации и распространения излучения в предположении, что оно является тормозным излучением электронов, высыпающихся из магнитосферы в ходе геомагнитных возмущений. С этой точки зрения рассмотрены наиболее значительные геомагнитные возмущения за период миссии КОРОНАС-Ф (6 и 24 ноября 2001 года, октябре-ноябре 2003, 20 ноября 2004 года, и 15 мая 2005 года). В указанных случаях отмечается локальное повышение рентгеновской атмосферной эмиссии, в области, отвечающей зазору между внутренним и внешним радиационными поясами.

37. Предложения экспериментов по изучению турбулентности и быстрых процессов во внешней магнитосфере Земли с высоким временным разрешением в будущих космических проектах

Рассмотрены варианты актуальных научных задач по исследованию турбулентности во внешней магнитосфере Земли с учетом результатов современных многоспутниковых проектов и возможности реализации в малобюджетном (односпутниковом) проекте. Установлено, что целесообразно сконцентрировать внимание на задаче исследования вариаций на ионных и суб-ионных масштабах (0.1-10 сек) в дневной внешней магнитосфере Земли, на ударной волне, магнитопаузе и переходном слое. В таком варианте возможно достижение конкурентоспособных результатов на одиночном спутнике при применении специализированных научных приборов. Предложен модельный состав научной аппаратуры, определены требования к космическому аппарату.

38. Анализ методов улучшения метрологических характеристик электрометров с высоким входным сопротивлением по результатам лабораторных испытаний.

Для исследования электрофизических характеристик приповерхностных плазменных образований на поверхности Луны и определения параметров низкоэнергичной плазмы в диапазоне энергий до 100 эВ на посадочных модулях станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс» предполагается установка специальных электростатических датчиков ЛЗЛ-100 (Лунный зонд Ленгмюра). В 2013 году был разработан и изготовлен макет такого датчика, работающего в диапазоне энергий до 15 эВ. В 2014 году проводились работы по анализу методов улучшения метрологических характеристик – в первую очередь повышения чувствительности, расширения диапазона энергий и повышения быстродействия при условии не превышения заданного веса и габаритных размеров. Была разработана методика расширения диапазона энергий до 88 эВ в заданных габаритах платы предусилителя (40x60 мм). Первые испытания работоспособности изготовленного макета ЛЗЛ-100 были проведены на вакуумной установке Объединённого Института Высоких температур (ОИВТ).

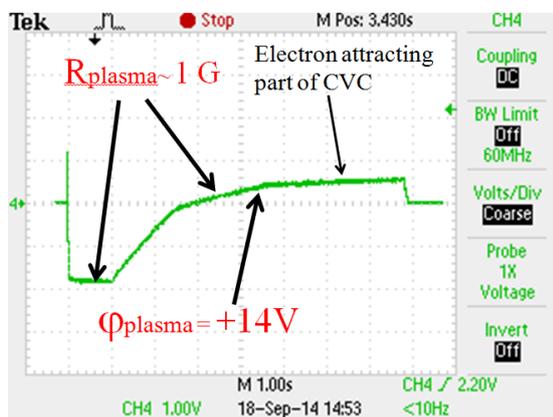


Рис. Результаты испытаний макета ЛЗЛ-100 в плазме вакуумной камеры. Запись выходного напряжения макета ЛЗЛ-100, из которой определяется вольт-амперная характеристика плазмы. Зонд был расположен на расстоянии ~30 см от электронного пучка ($E=3\text{кВ}$, ток пучка 0.5 мА).

39. Разработка и развитие методов спектродиагностической диагностики состояния полярной ионосферы. Подготовка новых перспективных орбитальных экспериментов в видимом и ВУФ диапазонах спектра.

Разработан детальный Аванпроект для создания бортового оптического комплекса приборов (для высокоапогейного и низкоорбитального КА) в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ), нацеленный на дистанционные исследования характеристик полярной ионосферы.

В рамках достижения результата проведены работы:

1. Разработан проект ТЗ на НИР «Авровизор-ВУФ-М»
2. Подготовлены рабочие материалы в доклад на заседании секции НТС ВПК при правительстве РФ, проведенной в ОАО корпорация «Комета» 9 октября 2014.
3. Разработан проект ТЗ на ОКР «ВУФ-Блеск».
4. Разработаны технические предложения по включению перспективного оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в ФЦП «Геофизика-2».
5. Разработаны рабочие материалы к дополнительному эскизно-техническому проекту по созданию ультрафиолетового канала в специальной системе.

40. Подготовка экспериментов по исследованию реголита Луны с помощью метода вторичной ионной масс-спектрометрии.

Эксперимент АРИЕС-Л представляет собой энерго-масс-спектрометр с полем зрения 2π . Широкое поле зрения позволяет одновременно измерять характеристики облучающего пучка (солнечный ветер) и характеристики вторичных ионов, выбиваемых солнечным ветром из лунного реголита. Прибор АРИЕС-Л также включает в себя конвертер нейтральных частиц, расположенный в поле зрения прибора. Поток нейтральных атомов от поверхности Луны, ионизуется на поверхности конвертера и также измеряется энерго-масс-анализатором. Также целью эксперимента является изучение взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. Прибор АРИЕС-Л входит в состав двух посадочных аппаратов Луна-Ресурс и Луна-Глоб и в состав орбитального аппарата Луна-Глоб.

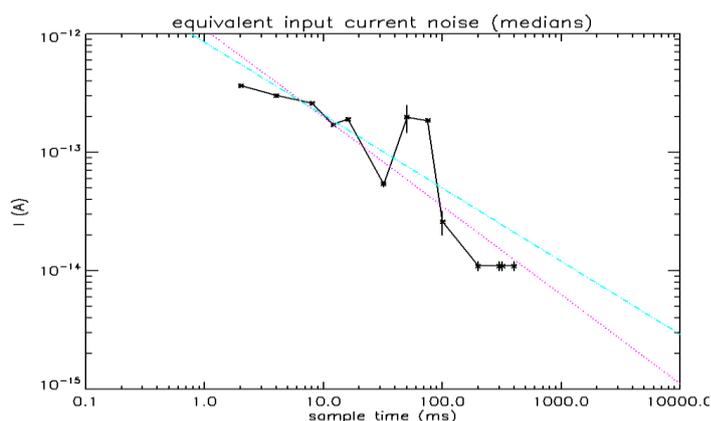
Проведены работы по исследованию характеристик модулей электронной оптики прибора АРИЕС-Л: пространственное разрешение, энергетическое разрешение $\Delta E/E$, проведена оценка массового разрешения. На основе полученных экспериментальных данных выполнены работы с целью улучшения аналитических характеристик прибора.

41. Электромагнитные волны в атмосфере и ионосфере Марса: разработка эксперимента по их исследованию

В работе рассмотрены возмущения магнитного поля, которые могут наблюдаться на поверхности Марса и являются результатом взаимодействия солнечного ветра с ионосферой Марса, с областями аномальной намагниченности на его поверхности, а также возмущения атмосферного происхождения, связанные с пылевыми торнадо. Получены предварительные оценки уровней вариаций магнитного поля на поверхности планеты для каждого из возможных источников. В работе представлен эксперимент по измерению магнитных полей, размещаемый на посадочной платформе, состав и технические характеристики которого позволяют проводить непрерывный мониторинг флуктуаций магнитного поля в диапазоне частот до 20 кГц в целях изучения ионосферы – магнитосферы Марса, атмосферных электромагнитных явлений и исследования внутреннего строения Марса.

42. Исследование возможностей увеличения отношения сигнал/шум в плазменных экспериментах по результатам лабораторных испытаний

В результате работ, выполненных в 2014 г. удалось повысить отношение «сигнал\шум» электрометрических усилителей, предназначенных для регистрации коллекторных токов плоских анализаторов холодной плазмы. Повышение достигнуто за счет оптимизации



схемных решений и применения низко шумящих ЭРИ. На рисунке показана зависимость величины шума от быстродействия усилителя или его полосы пропускания. При изменении быстродействия усилителя от 2мс до 200мс величины токов шумов изменяются от $3.5 \cdot 10^{-13}$ А до $1.0 \cdot 10^{-14}$ А

43. Подготовка к анализу данных плазменного эксперимента ROMAP на спускаемом аппарате PHILAE проекта ROSETTA и начало

Выполнена работа по подготовке программного обеспечения для анализа данных плазменного прибора РОМАП после посадки спускаемого аппарата PHILAE на комету Чурюмова-Герасименко. В самое последнее время началась работа с полученными с поверхности кометы результатами измерений прибора РОМАП.

44. Возможное обнаружение предвестников землетрясений по данным спутника Космос-900.

По данным спутника Космос 900 (1977-1979 гг.) показано, что в периоды землетрясений в земной ионосфере существуют специфические волновые явления, связанные с сейсмической активностью. Анализ позволил предложить кандидата в предвестники землетрясений: появление волнообразных вариаций с характерными масштабами ~ 300 - 450 с. Эти волнообразные плазменные вариации вытянуты вдоль магнитного поля и обычно заполняют куполообразную область вплоть до $\Delta\lambda = \pm 25$ - 30° по долготе и $\Delta f = \pm 40^\circ$ по широте.

45. Простой метод расчета траекторий ионов в электростатическом дефлекторе.

Предложен простой с точки зрения написания программы и быстрый по затратам процессорного времени метод расчета движения заряженных частиц внутри электростатического дефлектора. Приводятся примеры расчета дефлектора с отклонением частиц до $\pm \sim 50^\circ$ для ионного энергоспектрометра и их сравнение результатами лабораторных экспериментов. Почти идеальное совпадение говорит об эффективности предлагаемого метода расчета. Рассмотрены условия применения предложенного метода. Применение подобной методики весьма продуктивно при разработке спектрометров.

46. Исследование фотоэмиссии на спутнике Интербол-2 в магнитосфере при низкой солнечной активности.

Ранее проведенные исследования фотоэмиссии на спутнике Интербол-2 дополнены анализом ее поведения во время геомагнитных возмущений. Выявлено повышение фототока при увеличении геомагнитной активности (см Рис.). Этот эффект должен быть сопоставлен с другими факторами, влияющими на возрастания фотоэмиссии, например с ее зависимостью от времени нахождения КА на орбите и с кратковременными увеличениями фототока во время рентгеновских вспышек.

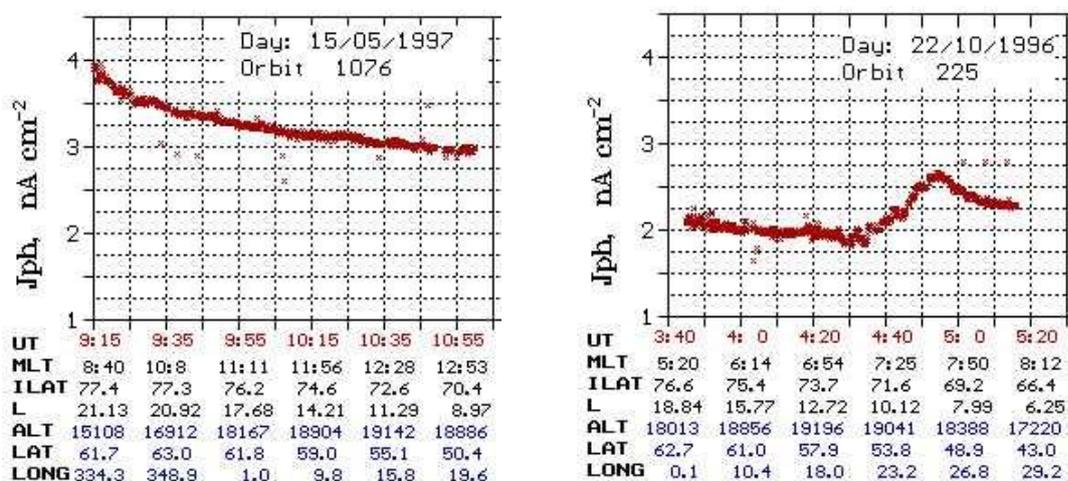


Рис. Примеры определения фототока на спутнике Интербол-2 во время геомагнитных возмущений с $K_p=7$ - (слева) и $K_p=4$ (справа).

1. Влияние типа межпланетного источника на длительности главной и восстановительной фаз магнитных бурь

На основе нашего каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра и базы данных OMNI, выполнено сравнение длительностей главной и восстановительной фаз магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра, и показано, что длительности двух фаз антикоррелируют для магнитных бурь, индуцированных областями сжатия типа CIR и Sheath, и оказываются независимыми для межпланетных проявлений выбросов СМЕ. Полученные результаты являются причиной того, что отсутствие или различия селекции магнитных бурь по их межпланетным источникам приводит к различиям в опубликованных результатах по длительностям главной и восстановительной фаз магнитной бури, а также их связи с величиной магнитной бури, определяемому по минимуму Dst индекса.

2. Определение коэффициента связи скорректированного (с учетом токов магнитопаузы) D_{st}^* индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными типами источников солнечного ветра

Выполнено моделирование скорректированного (с учетом токов магнитопаузы) D_{st}^* индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных 4-мя типами солнечного ветра (СВ): MC (10 бурь), CIR (28 буря), Sheath (21 буря), Ejecta (31 буря), аналогично тому, как это было сделано нами ранее для простого D_{st} индекса. Временной ход D_{st}^* аппроксимировался линейной зависимостью от интегрального электрического поля ($\sum E_y$), динамического давления (P_d), и уровня флуктуаций (sB) межпланетного магнитного поля (ММП). Анализ данных показал, что коэффициенты связи между величиной индекса и интегральным электрическим полем ($\sum E_y$) изменился мало и остался более высоким для Sheath и CIR: для MC -2.0 нТл/В м⁻¹ч (для Dst индекса был -2.5 нТл/В м⁻¹ч), для Ejecta -2.1 (-2.3), для Sheath -3.4 (-3.3) и для CIR -3.0 (-2.8). Таким образом подтвержден результат, что Sheath и CIR обладают более высокой эффективностью в генерации магнитных бурь, чем MC и Ejecta.

3. Изучение воздействия резких вариаций параметров солнечного ветра на процессы в магнитосфере Земли

Продолжалось изучение различных явлений в магнитосфере Земли, возникающих под действием резких изменений параметров солнечного ветра, прежде всего – быстрых скачков динамического давления, в том числе и происходящих при набегании на магнитосферу межпланетных ударных волн.

Установлено, что такие резкие (с длительностью фронта от нескольких десятков секунд до нескольких минут) скачки давления дают глобальный отклик в магнитосфере – высыпание частиц в дневном секторе, повышение активности (псевдо-брейккапы) в ночном секторе и развитие коротких пакетов низкочастотных колебаний геомагнитного поля.

4. Влияния высокоскоростных потоков солнечного ветра на формирование интенсивности потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли

Распределение низкоширотных открытых магнитных потоков на Солнце (корональных дыр) в период низкой солнечной активности (2006-2010) явилось основным фактором, определившим периодическую структуру потоков солнечного ветра (СВ) и соответствующих периодических структур в потоках электронов внешнего радиационного пояса Земли и в структурах Dst и Kp геомагнитных индексов. Найдено близкое подобие динамики общей площади низкоширотных корональных дыр и динамики скорости СВ в 2007-2009 г. Для этого периода характерна почти 100% корреляция 26-дневных вариаций полной площади низкоширотных корональных дыр и 26-дневных вариаций скорости СВ.

5. Радиационные условия на орбите и поверхности Марса

На орбите Марса поглощенная доза радиации под сферическим экраном из алюминия массовой толщиной 20 г/см^2 от частиц СКЛ составляет величину около 0,4 рад/год, от частиц ГКЛ ~ 10 рад/год, для сверхмощной солнечной вспышки не превысит ~ 5 рад. На поверхности Марса доза радиации от частиц СКЛ равна $\sim 0,11$ рад/год и от частиц ГКЛ порядка $\sim 5,1$ рад/год (с учетом вторичных частиц). В случае сверхмощной солнечной вспышки поглощенная доза радиации на поверхности Марса увеличится на ~ 2 рада. По результатам оценок сделан вывод, что атмосфера Марса эффективно защищает планету от космической радиации. Приведенные расчеты могут быть основой для оценки радиационных условий при планировании полетов к Марсу в период минимума солнечной активности 2018 – 2022 г.

6. Исследование химического состава солнечного ветра с аномально высоким давлением 21 января 2005г.

Аномальный состав источников солнечного ветра с содержанием гелия $> 20\%$ по числу частиц явился причиной наблюдавшегося 21 января 2005 г. уникального события с аномально сильным динамическим давлением до 100 нПа и экстремально большим поджатием дневной части магнитосферы вместе с головной ударной волной внутрь геостационарной орбиты.

7. Разработка методов определения электромагнитных параметров среднеширотной и приэкваториальной ионосферы в спокойных и возмущённых геомагнитных условиях. Изучение корреляционных связей между различными видами солнечной активности и электромагнитными и плазменными параметрами в окрестности МКС.

Магнитно-волновым комплексом академического микроспутника «Чибиc-М» (25 января 2012г. выведен на орбиту высотой 500 км и наклоном 52°) реализуется научная задача - мониторинг электромагнитных параметров космической погоды.

На основе полученных за ~ 3 -х лет работы на орбите сделан вывод, что повышение интенсивности волновой электромагнитной активности на субавроральных широтах в диапазоне 10-25 кГц является хорошим индикатором увеличения геомагнитной активности и наблюдательным параметром космической погоды, регистрируемым в ионосфере на космических аппаратах.

Статистическая обработка спектров КНЧ-ОНЧ – эмиссий непосредственно на борту космических аппаратов открывает новые возможности непрерывной регистрации электромагнитных параметров космической погоды.

8. Воздействие факторов земной и космической погоды на эффективность терапии больных гипертонической болезнью

Разработан кроссвалидационный алгоритм оптимизации подмножества ближайших соседей, функционирующий в составе общего программного модуля оценивания нелинейных функциональных связей DDR (Direct Dependence Recovery). Общая идея состоит в том, что оптимальные параметры заданного статистического семейства оценок определяются степенью непротиворечивости статистических выводов по отдельным непересекающимся группам наблюдений. Анализ базы данных больных гипертонической болезнью (81 мужчина и 101 женщина), находившихся на излечении в Городской клинической больнице №60 в период времени с 02.02.2011 по 06.11.2012 года при продолжительности пребывания порядка 14-18 дней показал, что практически у большинства гипертоников гипотензивная терапия подобранными препаратами дала положительные результаты (понижение систолического и диастолического давлений и частоты сердечных сокращений (ЧСС)). Однако наблюдались неожиданные скачки показателей, как оказалось, связанные с воздействием атмосферной температуры и геомагнитной активности (ГМА), причем наблюдались гендерные различия в эффектах реакции на эти воздействия. Например, у мужчин ЧСС повышается с ростом Кр-индекса ГМА во все дни пребывания в стационаре, несмотря на лечение. У нелеченных женщин ЧСС практически не зависит от Кр-индекса (см. Рис)

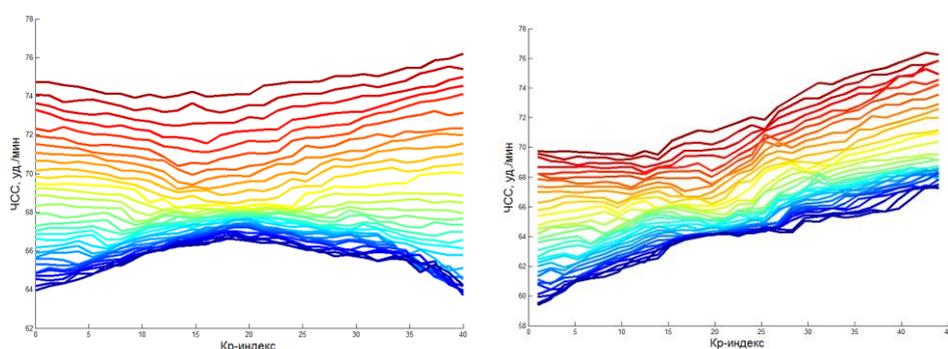


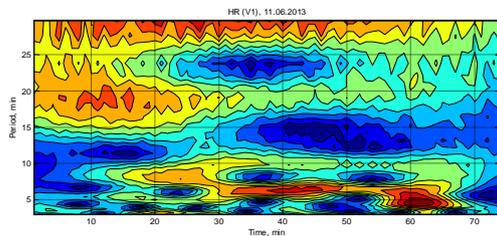
Рис. Срезы двумерной зависимости ЧСС для женщин (слева) и мужчин (справа) от Кр-индекса ГМА. Переход от красной (1-ый день лечения) к синей (последний день лечения) цветовой гамме соответствует эволюции одномерной зависимости ЧСС от Кр-индекса в период пребывания пациентов в клинике.

9. Разработка нового метода выявления солнечно-биосферных эффектов путем отсеивания прецедентов (выбросов)

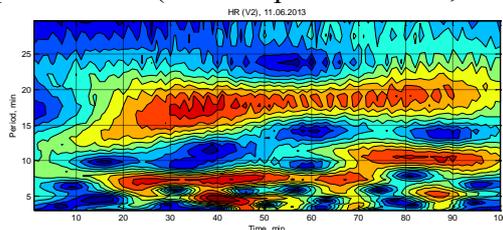
Предлагается робастный метод удаления прецедентов - выбросов из базы данных, основанный на интеллектуальном переборе полиномиальных кривых возможных зависимостей $y(x)$ с последующим отсеиванием далеко отстоящих от $y(x)$ прецедентов и оптимизацией коэффициента нелинейной корреляции между регулярными, т.е. оставшимися, прецедентами. Показано, что данная оптимизационная задача требует применения генетического алгоритма, основанного на коде Грея. Получены и проверены кросс-валидационным методом зависимости между различными медико-биологическими параметрами, такими как скорость распространения пульсовой волны и эндотелиальная функция, и характеристиками космической и земной погоды. При этом доказано, что, отсеивая не более 20% прецедентов, можно получить коэффициент нелинейной корреляции не меньше 0.5. Сопоставление предлагаемого метода и МНК-определения показало существенный проигрыш МНК-определения.

10. Синхронизации сердечного ритма человека с геомагнитными пульсациями рс5 на разных широтах

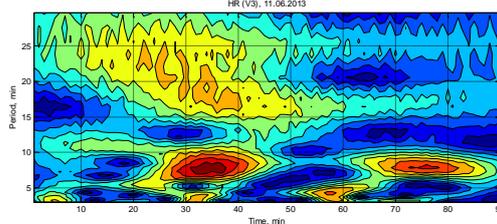
Впервые экспериментально показано (150 экспериментов, 35 волонтеров), что в геомагнитно-спокойных условиях спектрально-временная динамика сердечного ритма здорового человека в покое в значительной степени синхронизована с колебаниями геомагнитного поля в частотном диапазоне геомагнитных пульсаций РС5-6 (периоды от 3 до 30 мин). Эффект не зависел от пола и возраста добровольцев и наблюдался примерно в равной степени при измерениях в северных, средних и южных широтах. Данный эффект является важным шагом в понимании механизмов реакции биосистем на вариации геомагнитного поля.



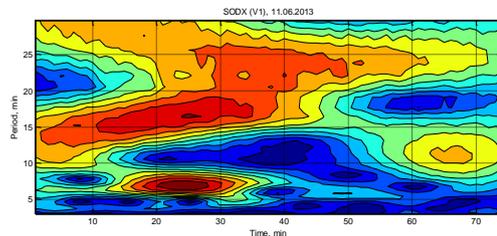
Архангельск (волонтер – женщина, 41 г.)



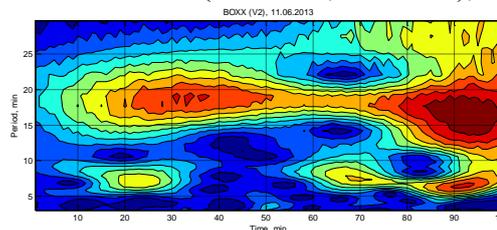
Москва (женщина, 44 г.)



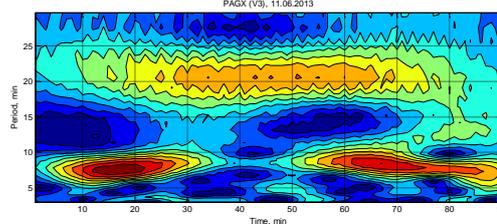
София (женщина, 54 г.)



Соданкюла (67.41° N, 26.58° E),



Borok (49° 51' N, 31° 34' E),



Panagjurishte (42.50° N, 24.18° E).

Рис. Результаты вейвлет-анализа эксперимента, проведенного 15.05.2013 синхронно в трех географических пунктах. Слева – вейвлет-спектры значений пульса, справа – вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля.

11. Влияние сильных магнитных бурь с генерацией P1-пульсаций на больных инфарктом миокарда

Выполнено исследование возможного влияния гелиогеофизических факторов, таких как магнитные бури и суббури на человека на основе анализа данных о числе вызовов скорой помощи по поводу инфарктов миокарда (ИМ) в г. Якутск. Установлено, что негативные эффекты на больных ИМ в субавроральных широтах могут оказывать только те большие магнитные бури, геомагнитные возмущения которых отмечаются в местное ночное время и сопровождаются развитием магнитосферных суббурь, сопровождающихся появлением интенсивных всплесков геомагнитных пульсаций P1 (периоды 1-40 с). Если главная фаза магнитной бури приходится на дневные часы местного времени, возрастания числа ИМ в это время не отмечается. Это значит, что при проведении корреляционных исследований на разных широтах и долготах использование индексов общей планетарной геомагнитной активности не всегда корректно.

12. Ухудшение психофизиологических показателей человека под действием СВЧ-излучения искусственного происхождения

На основании анализа обширной базы длительных наблюдений показано, что обладатели мобильных телефонов попадают в группу риска, к которой ранее относили профессионалов, работающих с радарами и другими СВЧ источниками промышленного назначения. В данной монографии приводится обстоятельный обзор современного международного состояния проблемы, включающий также официальные решения и декреты инстанций, как у нас в стране, так и международного уровня, Результаты собственных исследований за 6 лет, проводившихся в виде непрерывного мониторинга психофизиологических показателей центральной нервной системы у детей раннего школьного возраста в дицеях г. Москвы, показали, что хроническое воздействие ЭМИ негативно воздействует на центральную нервную систему; увеличивает время реакции на звуковой и световой стимулы; увеличивает число нарушений фонематического восприятия и число пропущенных сигналов при предъявлении звукового стимула; ухудшает показатели произвольного внимания и смысловой памяти; ухудшает показатели утомляемости и работоспособности. В монографии даны также соответствующие рекомендации.

Раздел Исследования гелиосферы.

Руководитель д.ф.-м.н. В.В. Измоденов.

1. Исследование в рамках модели политропного газа влияние теплопроводности в области внутреннего гелиосферного ударного слоя

В 2012 г. космический аппарат Voyager-1 пересек гелиопаузу на расстоянии 122 а.е. от Солнца. Это расстояние существенно меньше того которое предсказывается существующими моделями взаимодействия солнечного ветра и межзвёздной среде. Одним из возможных физических механизмов, приводящих к утоньшению гелиосферного ударного слоя и приближению гелиопаузы, является электронная теплопроводность. Эффект теплопроводности моделировался упрощенно, посредством уменьшения показателя политропы во внутреннем гелиошисе с $5/3$ до 1.06 . Для этого программный код модели был адаптирован для проведения расчетов с различными показателями адиабаты (рассмотрено приближенное решение задачи о распаде МГД разрыва для газов с разными показателями политропы). Проведенные самосогласованные кинетико-МГД расчеты, что происходит значительное (более чем в 2 раза) сокращение толщины внутреннего ударного слоя. Таким образом, электронная теплопроводность может сыграть определяющую роль в объяснении факта пересечения гелиопаузы космическим аппаратом Вояджер 1 на близком расстоянии в 122 а.е.

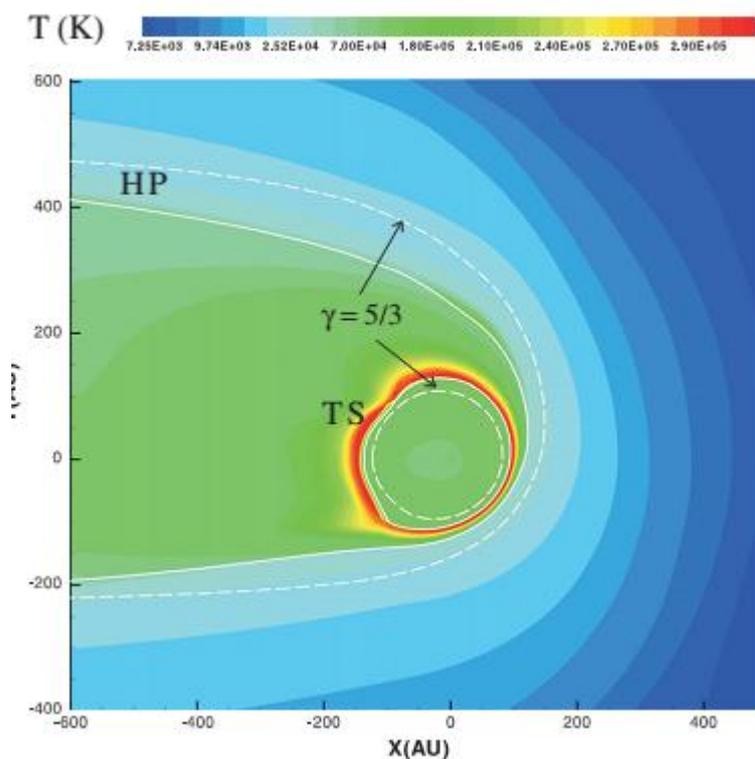


Рис. Структура гелиосферного ударного слоя. Цветом показана температура плазмы. Пунктирные кривые показывают положения гелиосферной ударной волны (TS) и гелиопаузы (HP) в случае модели без учета теплопроводности; сплошные кривые соответствуют модели с учетом теплопроводности в области внутреннего ударного слоя ($\gamma=1.06$).

2. Определение параметров скорости, направления и температуры локальной межзвездной среды на основе анализа измерений потоков межзвездных атомов гелия на космических аппаратах Ulysses и IBEX.

Недавние измерения потоков межзвездных атомов гелия на аппарате IBEX (в 2009-2011 гг.) показали, что величина и направление вектора скорости Локальной межзвездной среды (ЛМС) относительно Солнца отличается от определенных ранее на основании аналогичных измерений на аппарате Ulysses (в 1990-2007 гг.). Нами был проведен анализ данных Ulysses и IBEX в рамках современной кинетической модели распределения межзвездных атомов гелия, причем данные Ulysses за 2007 г. анализировались впервые. Показано, что данные Ulysses свидетельствуют о постоянстве вектора скорости ЛМС за все время измерения (17 лет), в то время как новый вектор скорости ЛМС, полученный из данных IBEX 2009 г., противоречит данным Ulysses по положению максимума потоков на карте неба (см. рис.). Показано, что это противоречие в скорости можно разрешить, если увеличить температуру ЛМС в период измерения IBEX с 6400 К до 9000 К. К такому увеличению температуры могут приводить дополнительные физические эффекты, такие как вторичные атомы гелия, а также упругие столкновения с протонами солнечного ветра.

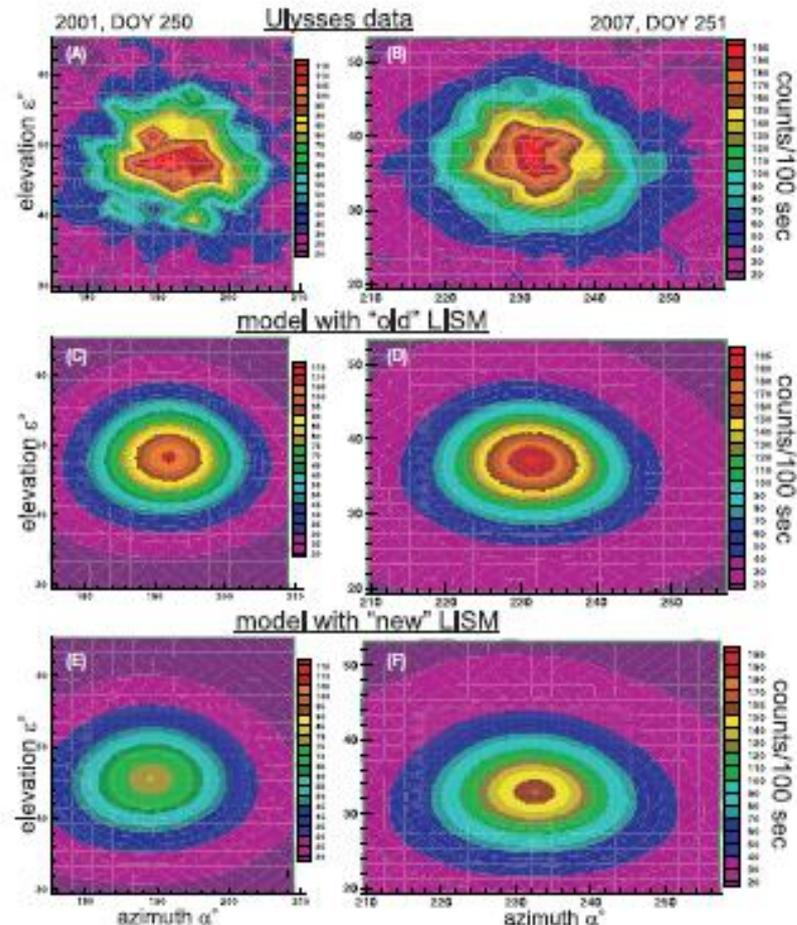


Рис. Карты неба в потоках атомов гелия для 2001 и 2007 гг. А-В – данные измерений Ulysses, С-Д – результаты численного моделирования со “старым” вектором скорости ЛМС из данных Ulysses, Е-Ф - результаты численного моделирования с “новым” вектором скорости ЛМС из данных IBEX.

3. Теоретическое исследование возможности удаленной диагностики межзвездного магнитного поля на основании измерений спектральных характеристик рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на орбите Земли.

Из предыдущего анализа данных SOHO/SWAN по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению в гелиосфере (Lallement et al., 2005, 2010) известно, что среднее направление движения межзвездных атомов водорода в гелиосфере отличается на несколько градусов от их направления движения в ЛМС. Такое отклонение объясняется косвенным влиянием межзвездного магнитного поля (ММП), приводящим к асимметрии гелиосферы (см. рис.). Нами было проведено исследования влияния на данный угол отклонения других параметров ЛМС, таких как концентрация протонов, атомов водорода и ионов гелия. Показано, что степень ионизации ЛМС значительно влияет на угол отклонения атомов (за счет большего или меньшего числа перезарядок), а также учет ионов гелия (He^+) приводит к увеличению угла отклонения. Таким образом, влияние этих эффектов сравнимо с влиянием ММП. Показано также, что результаты 3D кинетико-МГД модели гелиосферного ударного слоя с величиной ММП 4.4 мкГс и углом отклонения от вектора скорости ЛМС в 20° дают хорошее совпадение угла отклонения атомов водорода с данными измерений SOHO/SWAN.

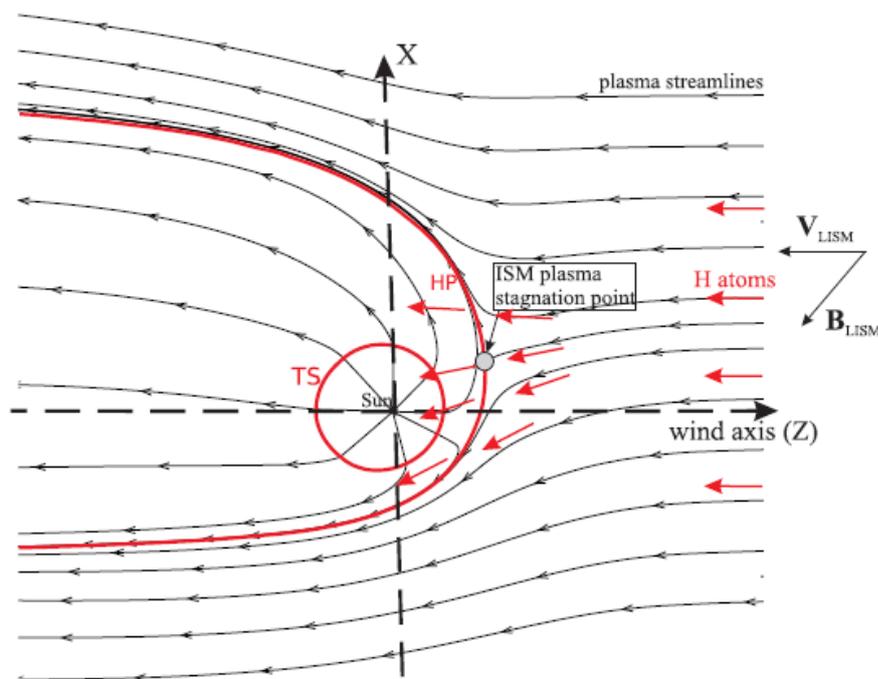


Рис. Качественная картина асимметричной гелиосферы, а также отклонения направления движения атомов водорода за счет влияния ММП.

Раздел Исследования звёзд.

Руководитель д.ф.-м.н. Г.С. Бисноватый-Коган.

1. Исследование магниторотационных сверхновых

Проведены расчеты магниторотационного взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром с уравнением состояния горячей сверхплотной ядерной материи с учетом нейтринных потерь при помощи метода ограничения потоков. Показано, что, обнаруженная нами ранее, Магнито-Дифференциально-Вращательная-Неустойчивость приводит к экспоненциальному росту всех компонент магнитного поля (Рисунок).

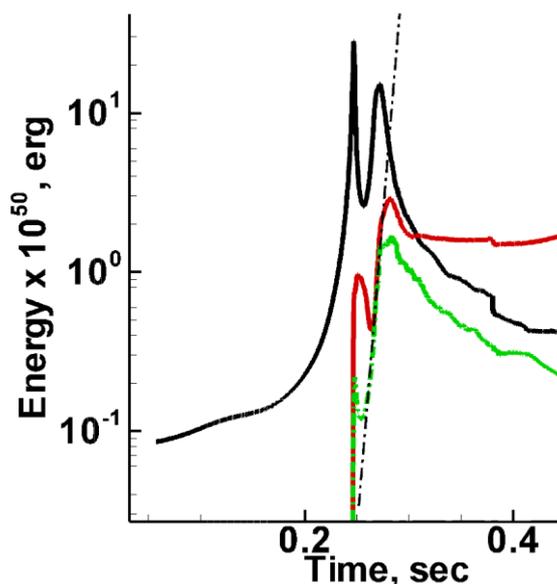


Рисунок. Зависимость от времени вращательной энергии E_{rot} (черная линия), магнитной полоидальной энергии E_{magpol} (красная линия) и магнитной тороидальной энергии E_{magtor} (зеленая линия) для случая $H_0 = 10^9 \text{ Гс}$, $E_{rot0}/E_{grav0} = 1\%$. Прямая штрихпунктирная линия показывает экспоненциальный рост тороидальной и полоидальной магнитных энергий со временем.

Проведен анализ имеющихся численных схем на неоднородных сетках, состоящих из тетраэдров, для моделирования астрофизических МГД задач. Выведены трехмерные сеточные операторы градиента и дивергенции на трехмерной сетке, состоящей из тетраэдров. Сформулирована краевая задача для численного нахождения гравитационного потенциала при помощи трехмерных разностных операторов.

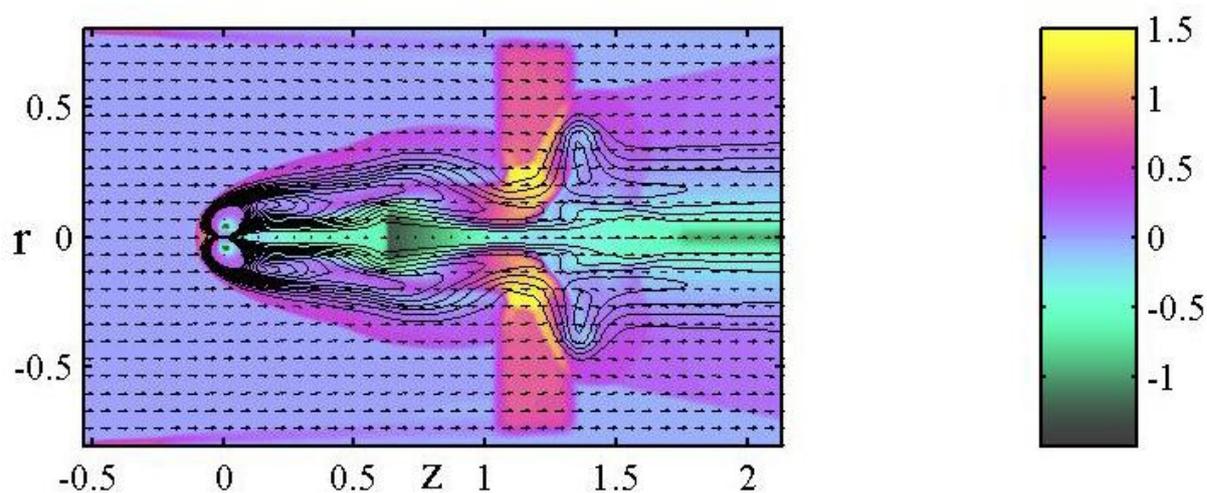
2. Расчет кинетических коэффициентов в замагниченной нейтронной звезде

Рассчитаны компоненты тензора теплопроводности частично вырожденных электронов в коре замагниченной нейтронной звезды, на основе решения уравнения Больцмана. Использовались 2-х и 3-х полиномиальное разложение. 3-х полиномиальное разложение значительно повышает точность. Сравнение с точным решением для Лоренцева газа, показывает, что оно отличается от точного решения менее чем на 5 %. При частичном вырождении электронов существенно е-е рассеяние, которое учитывалось очень грубо во всех предыдущих работах с магнитным полем

3. Движение замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду

При помощи МГД моделирования исследована задача о прохождении нейтронной звезды с магнитным полем через плотные облака и зоны турбулентности межзвездной среды. Получена картина течения вещества для разных параметров магнитного поля звезды, скорости движения звезды и плотности межзвездной среды. Все используемые параметры соответствовали режиму георотатора для одиночных нейтронных звезд.

В однородной среде силовые линии магнитного поля вытягиваются в направлении потока вещества вне магнитосферы и образуют длинный хвост. В хвосте наблюдается пересоединение магнитных силовых линий. В неоднородной межзвездной среде (плотное холодное облако) форма хвоста магнитосферы изменяется в зависимости от плотности межзвездной среды. При увеличении плотности ширина хвоста уменьшается, затем при уменьшении плотности хвост магнитосферы восстанавливает свою форму.



4. Неограниченные орбиты массивных частиц в шварцшильдовской метрике: аналитическое описание в случае сильного отклонения

Рассмотрены углы отклонения массивных пробных частиц, движущихся вдоль неограниченной траектории в шварцшильдовской метрике, в случае большого отклонения. Рассмотрен аналитически предел сильного отклонения, который является противоположным к обычно применяемому пределу малого отклонения и соответствует ситуации, когда массивная частица движется из бесконечности, совершает несколько оборотов вокруг центрального объекта и уходит на бесконечность. Мы записываем интегральное выражение для угла отклонения как явную функцию параметров, определяющих траекторию, и раскладываем его. Примечательно, что в пределе сильного отклонения, нам удалось впервые получить аналитические формулы для углов отклонения как явные функции параметров на бесконечности. В частности, показано, что в этом случае угол отклонения может быть вычислен как явная функция прицельного параметра и скорости на бесконечности, за пределами обычного предположения о малом отклонении.

5. Истечение горячего газа из скоплений галактик, в присутствии темной энергии.

Получено решение для истечения горячего газа из скоплений галактик в присутствии темной энергии. Антигравитация темной энергии разгоняет поток газа до больших скоростей после прохождения критической точки. При хаотическом движении скоплений навстречу друг другу возможно столкновение ускоренных ветров и генерация космических лучей самых высоких наблюдаемых энергий, не достижимых при падении газа на скопление с вириальной скоростью.

6. Наблюдения и анализ гамма-всплесков космического и земного происхождения

Оптические наблюдения более 50 областей локализации гамма-всплесков, послесвечения, их родительских галактик проводились в течение 2014 года в обсерваториях участвующих в международной сети наблюдения гамма-всплесков: в России и еще в 7 странах, обнаружена родительская галактика GRB 110530A.

Закончена обработка наблюдений и исследование темного гамма-всплеска GRB 051008. Найдены физические параметры источника всплеска и найдено наиболее вероятное объяснение природы оптически темного GRB 051008.

Закончен и выпущен каталог гамма-всплесков, кандидатов в гамма-всплески, SGR и AXP в эксперименте SPI/INTEGRAL.

Проведен поиск гамма-всплесков земного происхождения (TGF) в данных эксперимента SPI INTEGRAL на орбитах 1168, 1169, 1196, 1197, 1205, 1206, 1215, 1216, 1233, 1234. Подготовлена публикация. Сделана оценка возможного потока от TGF с учетом мертвого времени детектора телескопа SPI.

7. Исследование морфологических особенностей формирования плотных конденсаций при распространении ионизационно-ударного фронта в неоднородной межзвездной среде

Предложена, сформулирована и обоснована путем компьютерных расчетов новая модель расширения области H II RCW 82. Показано, что независимо от геометрии основного движения, накопление массы в неустойчивых крупномасштабных уплотнениях существенно уменьшает время гравитационного сжатия газовых сгустков. Последующая фрагментация оболочки способна приводить к образованию молодых звездных объектов.

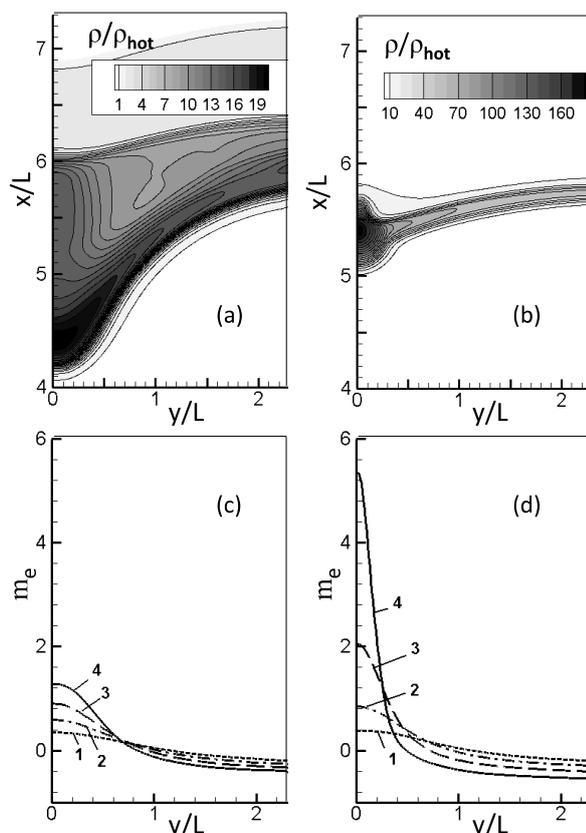


Рис. –Расчет морфология неоднородной оболочки области НП. Изохоры (a,b) и относительное накопление массы вещества в слое (c, d): без самогравитации (a, c) и с ее учетом (b, d).

8. Компьютерное моделирование автоволновых движений в областях активного звездообразования

Исследованы особенности применения разностных схем сквозного счета к расчету автоволновых движений газа, находящегося в поле излучения молодых звезд и содержащего пылевую компоненту. Рассмотрена эволюция плоских, цилиндрических и сферических волн. Установлены критерии роста амплитуды возмущений различной геометрии в зависимости от инкремента нарастания неустойчивости.

9. Образование оболочек вокруг красных сверхгигантов и их влияние на кривые блеска сверхновых типа II.

Самая яркая звезда в созвездии [Ориона](#) – красный сверхгигант Бетельгейзе – движется сквозь окружающую среду с большой peculiarной скоростью и генерирует впереди себя головную ударную волну. Недавние наблюдения радиоизлучения нейтрального водорода на волне 21 см в направлении на Бетельгейзе привели к открытию оболочки вокруг этой звезды, радиус которой примерно в три раза меньше радиуса головной ударной волны. Существование этой оболочки указывает на то, что ветер звезды тормозится какой-то внешней силой. Поскольку обе околозвездные структуры не могли быть образованы в результате взаимодействия звездного ветра с окружающей межзвездной средой, были высказаны сомнения в том, что внешняя структура является головной ударной волной.

Предложенная нами модель образования оболочки нейтрального водорода вокруг Бетельгейзе не требует отказа от существования головной ударной волны – естественного атрибута тел, движущихся со сверхзвуковой скоростью. Согласно этой модели, ветер звезды ионизируется внешним источником ионизирующего излучения, что приводит к возникновению стоячей ударной волны в нейтральной части ветра и к образованию за её

фронтом статической оболочки. Аналитические оценки и численное моделирование показали, что в таких оболочках может накапливаться до трети вещества, теряемого звездой на стадии красного сверхгиганта. Это вещество, оставаясь вблизи звезды до ее взрыва как сверхновой, может оказывать значительное воздействие на эволюцию кривых блеска многих сверхновых (так называемых сверхновых типа II_n).

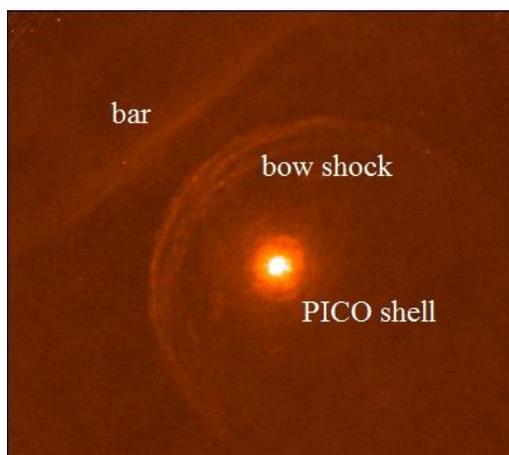


Рисунок. Инфракрасное изображение Бетельгейзе и ее окрестностей, полученное с помощью космического телескопа «Гершель». Звезда (центральная яркая точка) окружена внутренней оболочкой (яркая туманность вокруг звезды), образованной в результате ионизации ветра звезды внешним источником ионизирующего излучения (PhotoIonization-CONfined shell – PICO shell). Сверхзвуковое движение звезды относительно окружающей среды приводит к образованию головной ударной волны (bow shock) по ходу движения звезды. После того как Бетельгейзе взорвется как сверхновая, выброшенное при взрыве вещество будет взаимодействовать с внутренней оболочке, что существенно повлияет на кривую блеска сверхновой.