

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

1. Исследование процессов неадиабатического рассеяния электронов в радиационных поясах Земли за счёт деформации конфигурации силовых линий магнитного поля в процессе инжекции горячих частиц из магнитосферного хвоста.

Исследовано рассеяние релятивистских электронов на ночной стороне внешнего радиационного пояса. Рассмотрен частный случай низкой геомагнитной активности ($|Dst| < 20$ нТл), спокойного солнечного ветра, и отсутствия волновой активности. Для данных условий найдены несколько примеров наблюдений особого типа питч-углового распределения 1-3 мэВ электронов с минимумом на больших питч-углах (т.н. распределении типа бабочки). Показано, что такие распределения могут быть сформированы при рассеянии релятивистских электронов в экваториальной плоскости в случае, если магнитные силовые линии локально деформированы токами горячими ионами

2. 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 проведено исследование процессов ускорения и электронов волнами большой амплитуды и электростатическими низкочастотными структурами. Отдельное внимание уделено роли захваченных электронов в формировании электромагнитных полей низкочастотных структур. Рассмотрен вопрос устойчивости ускорения захваченных частиц. Проведено сопоставление эффективности нелинейного рассеяния и квазилинейно диффузии электронов магнитозвуковыми волнами.

3. Моделирование токовых слоев с широчной компонентой магнитного поля

До настоящего времени были разработаны модели бессильных токовых слоев с однородным распределением температуры и плотности плазмы поперек токового слоя (Harrison and Neukirch, PRL, 2009). В то же время, в том случае когда толщина токового слоя превышает характерные кинетические масштабы должен существовать произвол в выборе распределения температуры и плотности плазмы (при сохранении однородного распределения давления плазмы). В работе построены кинетические модели бессильных токовых слоев с неоднородным распределением параметров плазмы поперек токового слоя (обобщение модели Harrison and Neukirch, PRL, 2009). Обсуждается применение построенных моделей.

4. Токовые равновесия с самосогласованной сдвиговой магнитной компонентой B_y .

С помощью самосогласованной кинетической модели тонкого токового слоя (ТТС), основанного на методе макрочастиц, исследованы токовые равновесия с самосогласованной сдвиговой магнитной компонентой B_y . Показано, что сдвиговые конфигурации могут появляться в ТТС в результате самосогласованной эволюции при некотором небольшом магнитном возмущении B_y в центре токового слоя. Найдено две основные конфигурации магнитного поля в зависимости от поперечной к слою пространственной координаты z : симметричная (рис.1А) и антисимметричная (рис.1Б). Показано, что образование магнитного сдвига в ТТС обусловлено влиянием продольных токов, образующихся в центре токового слоя вследствие асимметрии квазиadiaбатического рассеяния ионов плазмы в направлении «север-юг». Дрейфовые ионные токи также вносят вклад в эволюцию магнитного сдвига, но их вклад намного меньше, чем квазиadiaбатический. Конечная конфигурация токового слоя зависит от величины нормальной B_z компоненты магнитного поля и от амплитуды начального возмущения сдвиговой компоненты B_y в ТТС. Представлена параметрическая карта, иллюстрирующая различные типы равновесий ТТС. Показано, что с большей вероятностью в системе с малой B_z компонентой формируется симметричная сдвиговая конфигурация, в то время как при больших значениях нормальной компоненты магнитного поля преобладает асимметричная структура.

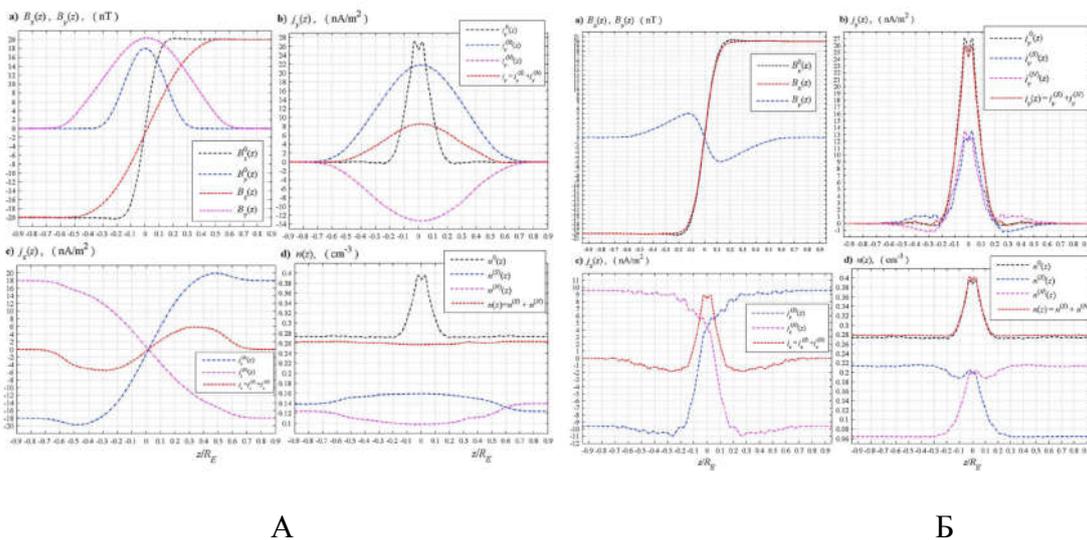


Рис. Симметричная (А) и антисимметричная (Б) конфигурации сдвигового магнитного поля, появляющиеся как результат самоорганизации в модели токового слоя.

5. Двухмерная одножидкостная МГД-модель аксиально-симметричного гелиосферного токового слоя, учитывающая дифференциальное вращение солнечной фотосферы и короны.

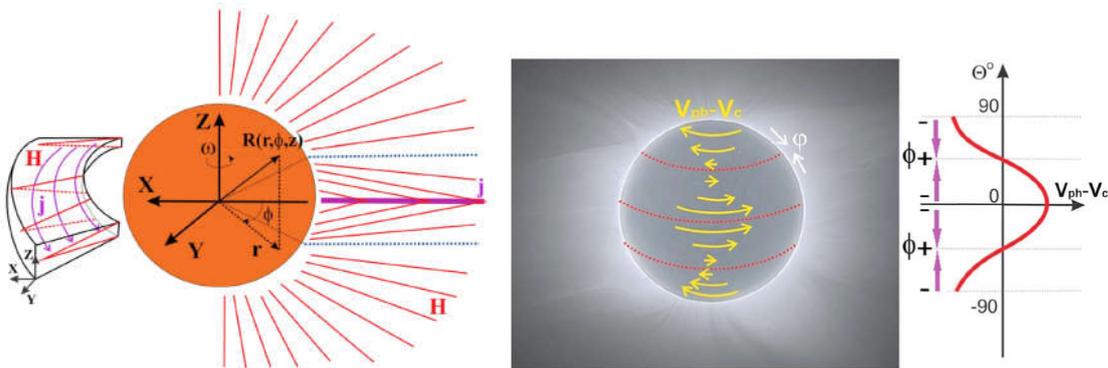


Рис. Модель гелиосферного токового слоя (слева) и распределение относительных скоростей короны Солнца и фотосферы (справа).

Приняты во внимание три компоненты межпланетного магнитного поля, скорость солнечного ветра, тепловое давление и диффузия в токовом слое. Модель описывает гелиосферный токовый слой как токовый диск, вложенный в плазменный слой, ограниченный в азимутальном направлении сепаратрисами, разделяющими области открытых и закрытых силовых линий. Толщина плазменного слоя уменьшается с радиальным расстоянием от Солнца и составляет приблизительно ~ 2.5 солнечных радиусов (R_0) на 1 АЕ (астрономической единице, равной расстоянию от центра Солнца до Земли). Модель позволяет получить пространственные распределения полоидального магнитного поля и плотности азимутального тока, которые зависят от граничных условий для концентрации и потоков в нейтральной плоскости. Распределения азимутального магнитного поля, скорости и полоидальной плотности тока зависят, главным образом от распределения электростатического потенциала, поддерживаемого в процессе униполярной индукции в солнечной короне. Полученные решения для полей, скоростей и токов в плазме солнечного ветра согласуются с паркерской моделью солнечного ветра на больших гелиоцентрических расстояниях и выше сепаратрис. Однако, в отличие от модели Паркера, При $r \lesssim 350 R_0$, спираль межпланетного магнитного поля может разворачиваться из-за изменения направления плотности полоидального тока (от направления на Солнце к антисолнечному). Резкое возрастание азимутальной плотности тока, происходящее на сепаратрисах, вызывает появление бифурцированных профилей плотности тока.

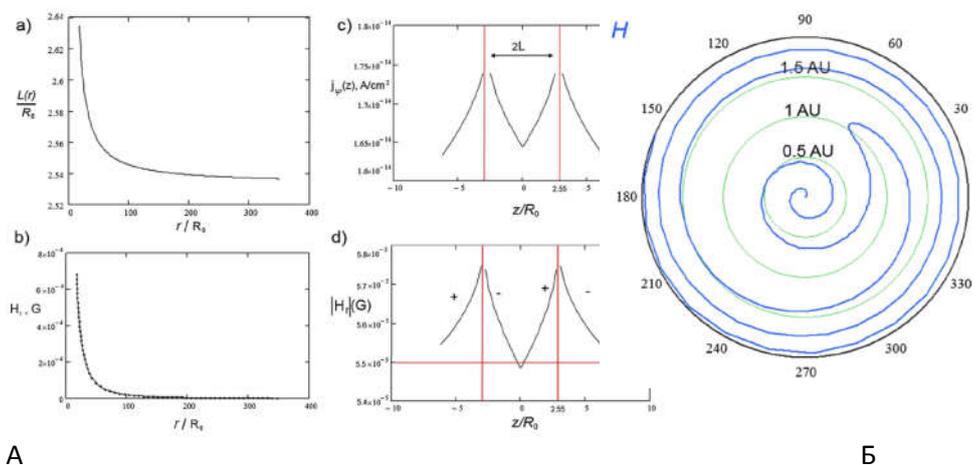


Рис. Найденные решения для гелиосферного токового слоя (А) и спираль межпланетного магнитного поля (Б), направление которой зависит от относительных скоростей вращения короны и фотосферы.

6. Самосогласованные численная и аналитическая модели тонких токовых слоев в бесстолкновительной плазме с учетом сдвиговой (шировой) компоненты магнитного поля.

Исследованы токовые равновесия в присутствии: 1) глобальной (постоянной в слое) сдвиговой компоненты $B_y = const$; 2) самосогласованной шировой компоненты B_y ; 3) сдвиговой компоненты смешанного типа, включающей в себя как постоянную, так и переменную составляющие. Проведен анализ плазменных равновесий и динамики частиц в широком диапазоне параметров модели. Показано, что по сравнению со случаем $B_y = 0$, структура токового слоя в присутствии магнитного шира может существенным образом

меняться, что обусловлено изменением динамики частиц, пересекающих токовый слой. Изучены механизмы формирования асимметричных токовых равновесий.

7. Немонотонные потенциалы над дневной поверхностью Луны, подверженной солнечному излучению.

Выведена система уравнений, описывающая немонотонное распределение электрического потенциала, возникающего вблизи лунной поверхности под действием солнечного ультрафиолетового излучения, для случаев, когда лунная поверхность: (1) обдувается солнечным ветром, (2) находится в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли. Для первого случая показано, что минимальное по высоте значение потенциала, практически, не зависит от плотности электронов, эмитируемых с поверхности под действием солнечного излучения, в то время как потенциал поверхности растет при увеличении плотности фотоэлектронов, причем оба потенциала обладают наименьшими значениями, когда скорость солнечного ветра находится в диапазоне скоростей характерных для медленного ветра при обычных условиях. Для второго случая, когда лунная поверхность находится в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли и при этом доступна солнечному излучению, значение минимума высотного профиля потенциала определяется параметрами плазменного слоя и не зависит от плотности фотоэлектронов, в то время как потенциал поверхности растет при увеличении их плотности, как и в первом случае. Ключевым параметром, в значительной степени определяющим профиль потенциала, в втором случае является отношение температур ионов и электронов плазменного слоя. Значения поверхностного и минимального потенциала возрастают при увеличении этого отношения, особенно резко в области значений меньших 3,5, при больших значениях оба потенциала продолжают расти, но более плавно.

8. Теоретическое исследование линейной стадии развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (К-Г) в рамках идеальной одножидкостной магнитной гидродинамики с использованием одномерно-неоднородной модели, учитывающей различие масштабов изменения скорости потока и изменения магнитного поля.

Проведено теоретическое исследование линейной стадии развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (К-Г) в рамках идеальной одножидкостной магнитной гидродинамики с использованием одномерно-неоднородной модели, учитывающей различие масштабов изменения скорости потока и изменения магнитного поля. Показано, что при наличии шира магнитного поля возмущения с волновыми векторами, направленными под углом к скорости потока, могут развиваться с большими инкрементами, чем колебания, распространяющиеся строго вдоль скорости потока. Установлено, что на направление распространения наиболее неустойчивых колебаний влияет отношение ширины переходного слоя, в котором изменяется направление и величины магнитного поля, к ширине переходного слоя по скорости потока. Анализ результатов численных решений дисперсионного уравнения показал, что уменьшение масштаба изменения магнитного поля в сравнении с масштабом изменения скорости благоприятно сказывается на развитии возмущений, распространяющихся под углом к скорости потока. Также проведено исследование зависимости инкремента и направления распространения наиболее неустойчивых колебаний от профиля плотности. Рассмотрены два крайних случая: профиль плотности имеет ту же ширину, что и профиль скорости, и масштаб изменения плотности значительно меньше масштаба изменения скорости потока. Численные результаты показывают, что в первом случае колебания развиваются с большими инкрементами, однако второй случай более благоприятен для развития колебаний, направленных под углом к скорости потока. Полученные результаты могут

быть использованы для описания развития неустойчивости К-Г в низкоширотном пограничном слое магнитопаузы Земли.

9. Исследование волновых эффектов, связанных с изменением ионного состава ионосферы с высотой и появлением на заданной частоте новой распространяющейся волновой моды. Исследование влияния столкновений на линейную трансформацию ионно-циклотронных волн в плазме, содержащей несколько сортов ионов.

Волны в диапазоне частот ниже протонной гирочастоты, которые могут распространяться в магнитоактивной плазме, существенно зависят от ее ионного состава. Добавление нового сорта ионов приводит к появлению новой резонансной частоты, на которой показатель преломления обращается в бесконечность, и новой частоты отсечки, на которой показатель преломления обращается в нуль. При этом появляется новая ветвь колебаний, которая лежит выше частоты отсечки. Возникает вопрос о возбуждении этих колебаний при наличии в плазме волны соответствующей частоты, распространяющейся в другой волновой моде. Показано, что возбуждение новой ветви колебаний при этом не происходит.

В диапазоне частот между циклотронными частотами двух ближайших ионов, но выше частоты отсечки существует две распространяющиеся моды: Р-мода, показатель преломления которой обращается в бесконечность на гирочастоте более легкого иона, и S-мода, показатель преломления которой на этой частоте остается конечным. В отсутствие столкновений коэффициенты трансформации $T(P \rightarrow S)$ и $T(S \rightarrow P)$ равны. Показано, что при учете столкновений коэффициенты трансформации $T(P \rightarrow S)$ и $T(S \rightarrow P)$ становятся различными, причем $T(P \rightarrow S)$ возрастает по сравнению с бесстолкновительным случаем, а $T(S \rightarrow P)$, напротив, убывает, так что при учете столкновений $T(P \rightarrow S) > T(S \rightarrow P)$. При увеличении частоты столкновений этот эффект усиливается, особенно для больших частот волн.

10. Обзор некоторых проблем, связанных с ионосферно-магнитосферными связями.

Наряду с внутренними источниками волн в плазме – неустойчивостями, важную роль в динамике магнитосферно-ионосферной системы играют внешние источники. Эти источники могут быть как естественного происхождения, как например излучение молниевых разрядов во время грозовой активности, так и иметь антропогенную природу, как например излучение радиопередатчиков: коротковолновых нагревных станций и мощных ОНЧ-передатчиков. В обзоре обсуждается роль этих излучений в процессе высыпания частиц в ионосферу из магнитосферы. Воздействие излучения на околоземную плазму в активных экспериментах обсуждается на основе прямых измерений на борту космических аппаратов. Взаимодействие же излучения молниевых разрядов с заряженными частицами в ионосфере и магнитосфере исследовано теоретически, с учетом особенностей спектра излучения на больших расстояниях от источника.

11. Наблюдение на спутниковой системе CLUSTER магнитозвуковых волн на высоких гармониках протонной гирочастоты и описание механизма возбуждения этих волн, который объясняет основные особенности их спектра.

В плотной плазме быстрые магнитозвуковые волны занимают частотный диапазон между гирочастотой протонов и электронов. Показано, что волны с частотами ниже частоты нижнего гибридного резонанса и распространяющиеся под большим углом к внешнему магнитному полю, не испытывают существенного затухания на электронах, но могут эффективно взаимодействовать с протонами в случае, если частоты волн близки к

гармоникам протонной гирочастоты. В случае неустойчивой функции распределения протонов это взаимодействие приводит к возбуждению волн на частотах, близких к гармоникам протонной гирочастоты, что и наблюдалось экспериментально на спутниках CLUSTER.

12. Недиффузионное ускорение ионов ионно-циклотронными волнами, генерируемыми молниевыми разрядами.

Проведено моделирование методом пробных частиц процесса резонансного взаимодействия надтепловых ионов с волновыми пакетами ионно-циклотронных волн в области, где частоты волны близка к локальной ионной циклотронной частоте. Показано, что, в соответствии с теоретическими предсказаниями, такое взаимодействие носит недиффузионный характер. Точнее, было продемонстрировано, что даже в случае, когда функция распределения пробных частиц имеет плато на распределении по скоростям вблизи резонансной скорости, рассматриваемое резонансное взаимодействие приводит существенному нагреву частиц и, следовательно, к затуханию волны.

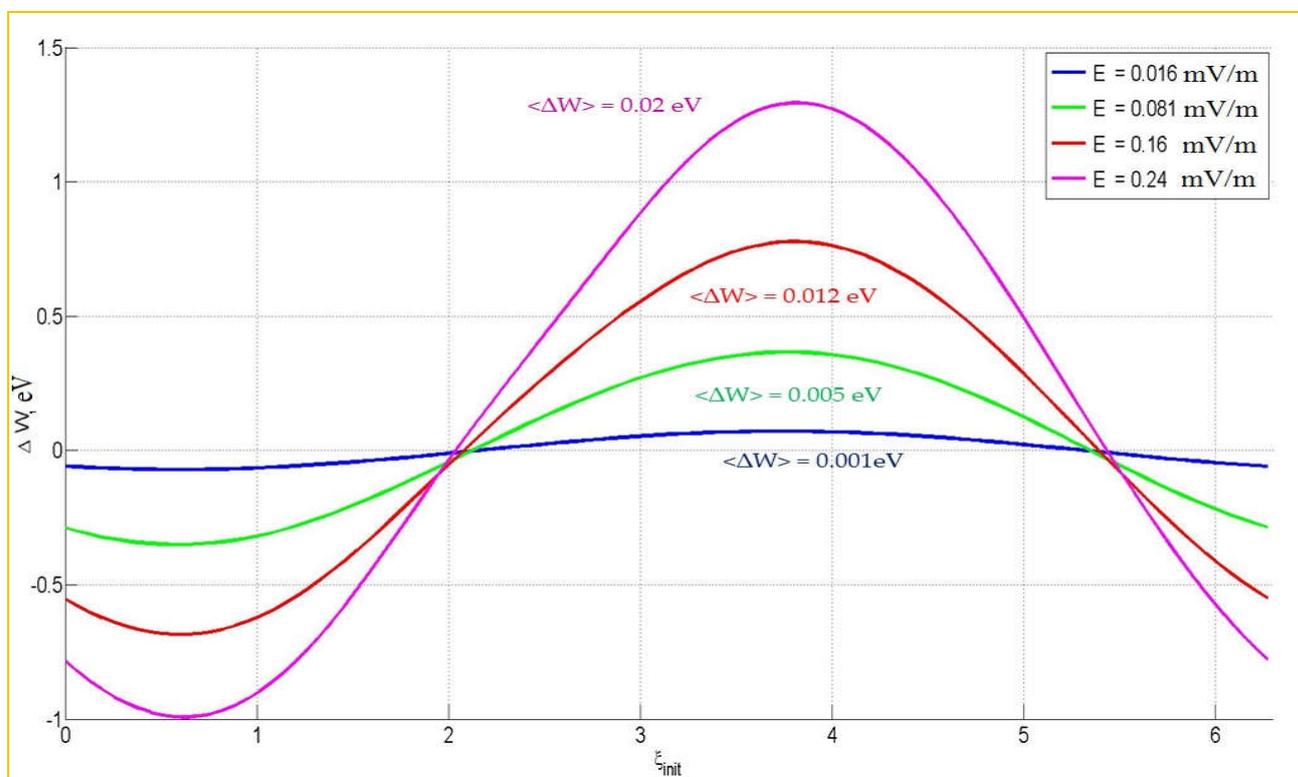


Рис. Приращение энергии пробной частицы за счёт взаимодействия с волной в зависимости от начальной фазы частицы для разной амплитуды поля. Над графиками показаны средние значения приращения энергии.

13. Моделирование распада ленгмюровских волн в неоднородной плазме солнечного ветра.

На основе численного моделирования представлено исследование ленгмюровской турбулентности в плазме солнечного ветра которая возбуждается электронными потоками изучается. В частности, рассмотрены нелинейные процессы распада ленгмюровских волн с участием ионно-звуковых волн и анализируется их зависимость от внешних длинноволновых флуктуаций плотности плазмы. Показано, что в присутствии неоднородностей процессы распада локализованы в пространстве, и, из-за разницы групповых скоростей ленгмюровских и ионно-звуковых волн, длительность их

взаимодействия ограничена, так что полное нелинейное насыщение неустойчивости не достигается. Отмечено также, что отражение и рассеяние ленгмюровских волновых пакетов на случайно изменяющихся флуктуациях плотности окружающей среды и плотности оказывают важное влияние на развитие спектра ионно-звуковых волн. Примечательно, что биения между ленгмюровскими волнами распространяющихся вперед, и волнами отраженными могут привести к параметрической генерации ионно-звуковых волн заметной амплитуды и ускорить распадные процессы. Эти процессы, повторяющиеся в разных областях пространства, образуют серии каскадов передачи энергии волны, аналогичные тем, которые изучались в рамках слабой теории турбулентности. Изучены динамика такого механизма каскадирования и его влияние на ускорение самой энергичной части электронного пучка. Наконец, обсуждается роль процессов распада в формировании профилей ленгмюровских волновых пакетов, и показано, что сигналы, которые в последнее время наблюдались на борту космических аппаратов STEREO и WIND и сигналы, рассчитанные по результатам моделирования, подобны.

14. Исследование генерации нелинейных всплесков электрического поля во внешнем радиационном поясе при параметрическом распаде свистовых волн.

Огромное количество различных нелинейных структур (двойные слои, “дыры” в распределении электронов, нелинейные вистлеры и т.д., называют структуры временной области, TDS) были обнаружены с помощью датчика электрического поля в эксперименте Зонд Ван Аллена. Те из TDS, которые связаны со свистовыми волнами, часто возникают пна переднем крае волнового пакета и образуют цепочки. В работе аналитически, а также экспериментально, с использованием данных зонда Ван Аллена исследован параметрический распад вистлерной волны в другой вистлер, распространяющейся в противоположном направлении и электронно-акустическую волну. Предполагается, что возникающая в результате электроно-акустическая волна является источником TDS электронного масштаба. Измеренные параметры трех волн (два вистлера и электронно-акустическая мода) находятся в хорошем согласии необходимым условием их параметрического резонанса: $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$ и $k_0 = k_1 + k_2$. Анализ бикогерентности показывает нелинейный характер наблюдаемых электронно-звуковых волн также как корреляцию соотношения фаз вистлеров и электронно- звуковой волны. Оценка темпа роста распадной неустойчивости показывает, что взаимодействие трех волн может развиваться за характерное время меньше, чем 1 с, таким образом, скорость процесса достаточно высока, чтобы объяснить наблюдения. Таким образом можно утверждать, что индуцированное параметрическое взаимодействие является быть одним из механизмов квазипериодических TDS внешнего радиационного пояса Ван Аллена.

15. Вероятностная модель взаимодействия пучка и плазмы в случайно неоднородной плазме.

Целью данного исследования является оценка влияния случайных флуктуаций плотности плазмы на релаксацию электронного пучка. Предлагается вероятностная модель описания релаксации пучка на основе статистических свойств распределения флуктуаций в которой взаимодействие волна-частица сначала рассматривается на малых пространственных интервалах с линейным профилем плотности плазмы, а затем производится усреднение по вероятностям распределения колебаний плотности. Этот подход позволяет оценить изменения плотности энергии волны и скорости частицы, в зависимости от градиента плотности. Наличие неоднородности плазмы приводит к изменению фазовой скорости волн и вызывает уширение резонанса взаимодействия волна-частица и удлиняет характерное время эволюции функции распределения

электронов в пространстве скоростей и энергии волн по сравнению с временем резонансного взаимодействия волна-частица в однородном случае. Переходя к описанию процесса релаксации в терминах усредненных величин, получаем систему уравнений, обобщающих известные уравнения квазилинейного приближения, и в которых обычный коэффициент диффузии D в пространстве скоростей и инкремент γ роста волны вычисляются с учетом усреднения в фазовом пространстве флуктуаций плотности (уширения резонанса). Формы функций D и γ полностью определяется статистическими свойствами функции распределения амплитуд флуктуаций. Показано, что в случае гауссова распределения процесс релаксации определяется только скоростью пучка и дисперсией флуктуаций плотности.

16. Обзор по теории самоорганизованной критичности и аспектов её приложений в физике космической и лабораторной плазмы.

В обзоре рассмотрены процессы самоорганизации неравновесной космической плазмы в магнитосфере Земли и межпланетном пространстве. Освещены также некоторые, связанные с динамикой хвоста магнитосферы вопросы авроральной активности и возникновения частиц высоких энергий. Рассмотрена взаимосвязь явления самоорганизованной критичности с представлениями о гидродинамической турбулентности, многомасштабности, эволюционными процессами, фазовыми переходами II рода. Резюмируются результаты наблюдений и экспериментов, анализируется накопленный экспериментальный материал, выделены нерешенные проблемы как в общей теории, так и в свете обработки и интерпретации данных наблюдений. Изложен термодинамический подход к рассматриваемым проблемам на основе энтропии Тсаллиса.

17. Нелокальный перенос за счёт турбулентного усиления.

Показано, что обменные процессы в сложных системах и связанное с ними формирование самоорганизованных критических состояний могут конкурировать с процессами обратной спектральной перекачки энергии от малых масштабов в большие, характерными, в частности, для двумерной гидродинамической турбулентности. В результате в системе возникают состояния нового типа, отличные от обычных критических состояний на пороге хаоса. Их отличительным признаком являются процессы переноса аномально высокой интенсивности, связанные с возникновением и распадом когерентных диссипативных структур. Рассмотрены механизмы возникновения подобных явлений в задаче о сильной электростатической турбулентности с использованием уравнений Хасегавы-Вакатани. Показано, что порогом возникновения аномальных явлений большой амплитуды является малость времени Ринеса (Rhines time) по сравнению с характерным временем развития неустойчивостей. Данное условие выполняется в режиме сильной нелинейности и подразумевает значительные отклонения состояний системы от маргинально устойчивого состояния (state of marginal stability) на пороге хаоса. Аналогичные условия получены для геофизических (geophysical fluid) потоков с поперечным сдвигом и образования крупномасштабных вихревых структур в атмосфере.

18. Гамильтонов подход к описанию самоорганизованного критического поведения в сложных системах на основе дискретного уравнения Андерсона со случайным потенциалом и нелинейностью алгебраического типа.

Показано существование фазового перехода из локализованного в свободное состояние вблизи сепаратрисы (для квадратичной нелинейности), с этой целью разработан метод редуцированного отображения на дерево Кэли (the "backbone" map). Устанавливается связь уравнения Андерсона с обобщенными (немарковскими) процессами переноса в

пространстве волновых чисел. Излагаемый новый подход к анализу немарковости применён для вывода уравнения диффузии с дробной производной по времени. Построена топологическая классификация дискретного уравнения Андерсона по порядку нелинейности, получены ограничения на тип самоорганизованного критического поведения в пределе больших времен. Получены значения индекса связности в области сепаратрисы для произвольной степени нелинейности.

19. Интерпретация пространственно-протяженных быстрых микровспышек в нижней атмосфере Солнца в рамках модели "топологического триггера".

Было проведено более глубокое теоретическое и численное исследование возможности инициирования магнитного пересоединения быстро движущейся нулевой точкой при неустойчивой конфигурации магнитных полей в модели "топологического триггера" (Горбачев и др., 1988). В наших расчетах были подтверждены основные параметры движения быстрой нулевой точки. Однако при этом установлено, что динамика "топологического триггера", по-видимому, не сопровождается возникновением новых сепаратрисных поверхностей и соответствующим глобальным перераспределением магнитных потоков, как это обычно предполагалось ранее. Таким образом, данная модель применима не столько к развитию больших солнечных вспышек, сколько к пространственно-протяженным, но относительно слабым по энерговыделению микровспышкам.

С учетом вышеизложенных обстоятельств теоретического анализа, нами был произведен поиск быстрых пространственно-протяженных микровспышек в хромосфере Солнца по измерениям на спутнике Hinode в линии Ca II. При этом были действительно обнаружены случаи, хорошо укладывающиеся в модель "топологического триггера". В среднем, детектируется по одному такому случаю за 10 часов наблюдений в поле зрения аппаратуры вышеупомянутого спутника при условии, что она ориентирована на области мелкомасштабных солнечных пятен со сложной (чередующейся) магнитной полярностью.

20. Исследование на основе точно решаемых моделей резонансного туннелирования электромагнитных волн через градиентные барьеры в космической плазме.

На основе точно решаемой модели уравнения Гельмгольца рассмотрено резонансное туннелирование поперечной электромагнитной волны через слой плазмы с мелкомасштабными (субволновыми) неоднородностями, для описания которого использование приближенных методов некорректно. Толщина слоя может быть произвольной и включать большое количество областей непрозрачности, в которых диэлектрическая проницаемость плазмы отрицательна. Рассмотрены варианты сложных неоднородностей плазмы, когда пространственный профиль плотности плазмы определяется рядом свободных параметров, определяющих глубину модуляции диэлектрической проницаемости, характерные размеры структур плотности, их количество, толщину слоя неоднородной плазмы. При определенном выборе параметров задачи возможны сильные вариации амплитуды электрического поля волны в плазменном слое (изменение амплитуды в десятки-сотни раз). Установлено, что при реализации безотражательного прохождения через слой падающей из вакуума волны (просветление градиентных барьеров) профили неоднородности могут меняться значительно. Неоднородность может включать случайную компоненту, результаты расчетов этого варианта будут представлены в последующих работах. При учете кубической нелинейности также возможно точное решение одномерной задачи о нелинейном просветлении плазмы. Интересно, что за счет нелинейности толщина областей непрозрачности заметно уменьшается. Задача о резонансном туннелировании

электромагнитных волн через подобные барьеры представляет интерес для целого ряда практических приложений включая космическую плазму (передача энергии и сигналов через слои плотной плазмы).

21. Структура самосогласованных электромагнитных полей и параметров бесстолкновительной плазмы при развитии локальных волновых возмущений в магнитосфере Земли. Исследование электродинамики формирования заряда тела в космической плазме. Развитие методик анализа возмущений с учетом принципиальной роли нелинейности среды.

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

22. Исследование разрушения адиабатических инвариантов в процессе нелинейной динамики заряженных частиц в электромагнитных полях сложной конфигурации.

Рассмотрена задача о нерезонансном ускорении заряженных частиц высокочастотной электростатической волной, распространяющейся поперек магнитного поля. Предполагается, что скорость частицы много меньше фазовой скорости волны, так что резонанс волна-частица невозможен и ускорение в случае однородного магнитного поля отсутствует. Показано, что если на магнитное поле наложены пространственные флуктуации, то частица может быть ускорена волной. Возникновение ускорения связано с тем, что флуктуации магнитного поля разрушают препятствующую ускорению адиабатическую инвариантность в движении частицы.

23. Исследование характеристик стационарных зеркальных структур в космической плазме.

Для стационарных зеркальных структур, описываемых с помощью анизотропной МГД, найден вариационный принцип для трехмерной геометрии, когда поперечное и продольное давления космической плазмы зависят от модуля магнитного поля. Последнее возникает из решения стационарных дрейфовых кинетических уравнений для электронов и ионов с учетом электростатического поля при условии, что функции распределения зависят от энергии и адиабатического инварианта. Численно для двумерной геометрии (x , y) при учете эффектов конечного ионного радиуса показано, что стационарные структуры представляют собой полосы с разными значениями величины магнитного поля для случаев, когда магнитное поле лежит в плоскости (x , y) или в форме пузырей при B_z выше некоторого критического значения (ниже критического значения возникают

полосы). При этом учет эффекта конечного ионного ларморовского радиуса приводит к поверхностному натяжению.

24. Численные исследования серфотронного ускорения частиц пакетами электромагнитных волн в космической плазме в применении к спектру космических лучей.

На основе численных расчетов нелинейного уравнения для фазы волны на траектории частицы исследована нелинейная динамика серфотронного ускорения заряженных частиц пакетом электромагнитных волн, распространяющимся поперек внешнего магнитного поля в космической плазме. Реализация серфинга зарядов возможна в центральной части локализованного пакета, где электрическое поле превышает пороговое (для серфотронного ускорения) значение. Расчеты показали, что для сильно релятивистских начальных значений продольной компоненты импульса частиц их захват в режим ультрарелятивистского ускорения происходит в одном интервале благоприятной начальной фазы пакета на траектории частицы сразу. В другом интервале начальных фаз захват частиц в режим серфинга на пакете не происходил даже при довольно большом времени вычислений. Этот результат позволит в последующем значительно упростить обобщение используемой модели в целях учета затухания пакета и волн на ускоряемых частицах и сделать корректные оценки числа ускоренных частиц. Оценки в приложении к плазме местных межзвездных облаков показывают возможность доускорения захваченных частиц в область энергий порядка тысяч ТэВ и более. Расчеты подтвердили ранее сделанное заключение о том, что при ультрарелятивистском ускорении компоненты скорости, импульса и релятивистского фактора частиц выходят на асимптотические значения, а темп ускорения практически постоянен и не зависит от амплитуды волнового пакета, которая однако должна быть выше некоторого порогового значения. После пересечения волнового пакета (с фазовой скоростью) частица совершает ларморовское вращение. Результаты представляют интерес для развития современных представлений о возможных механизмах возникновения вариаций потоков ультрарелятивистских частиц в космической плазме, в частности, в области колена на зависимости потока частиц от их энергии. Из проведенного анализа также следует вывод о необходимости проведения расчетов (для случая отсутствия захвата частиц в режим серфинга на использованной аппаратуре в начальный момент времени) с привлечением суперкомпьютерной техники.

25. Теоретическое исследование параметров упорядоченных структур нижней ионосферы включая транспортные свойства и электродинамику. Анализ оптимальных условий прохождения внутренних гравитационных волн из тропосферы в ионосферу при наличии зональных ветров с генерацией в ионосферной плазме индикаторов кризисных процессов.

Ионозонд высокого разрешения, установленный на высокоширотной обсерватории в Соданкюла, позволил впервые определить необычные детали взаимодействия E и F областей ионосферы в спокойный геомагнитный период. Рассмотрен случай 15 августа 2009 г., когда был зарегистрирован неоднородный по плотности спорадический слой E, имеющий кроме того протяженную по высоте структурность (до 10 км высоты). Со спорадическим слоем ассоциировался структурированный F слой с областью пониженной плотности плазмы. Это событие было проанализировано с учетом присутствия перемещающихся ионосферных возмущений, которые могут инициировать взаимодействие двух областей ионосферы. Выводы эксперимента сравнивались с существующими теориями, и было найдено, что количественно наблюдения согласуются с предложенным нами ранее представлением об электродинамическом взаимодействии E

и F слоев, в результате которого над спорадическим слоем в F области формируется область пониженной плотности.

Согласно результатам зондирования нижней ионосферы на высотах около 100 км, длительность радиоотражений от достаточно плотных ионизованных метеорных следов, характеризующая их время жизни, может достигать десятков секунд – десятков минут. Это заметно больше времени расплывания порядка долей секунды – нескольких секунд, которое считается типичным в измерениях посредством метеорных радаров. Показано, что запыленность плазмы нижней ионосферы влияет на коэффициент амбиполярной диффузии, определяющий расплывание неоднородностей плазмы. При этом коэффициент диффузии существенно изменяется в зависимости от заряда пылинок и их размера, что позволяет объяснить имеющиеся результаты ионосферного зондирования.

Результаты измерений метеорного радара на высокоширотной обсерватории Соданкюла (Финляндия) позволили исследовать температуру и нейтральный ветер за период 2008-2014 гг. В условиях низкой солнечной активности были обнаружены внезапные мезосферные похолодания, связанные с внезапными стратосферными потеплениями 2009 и 2010 гг., тогда как во время высокой солнечной активности 2013 г. тепловые структуры отсутствовали. Мезосферно-ионосферные тепловые аномалии наблюдали одновременно посредством метеорного радара, спутника Ауга и ионозонда высокого разрешения. Были получены следующие результаты: мезосферный температурный минимум имел место на 1 день раньше стратосферного потепления, амплитуда обоих эффектов сопоставима – около 50 градусов, причем охлаждение мезосферы закончилось быстрее, чем потепление стратосферы; в ходе стратосферного потепления в мезосфере имел место ветровой сдвиг порядка 70 м/с•км; вектор скорости ветра вращался по (против) часовой стрелки с северо-востока (юго-востока) на юго-запад (северо-запад) выше (ниже) 90 км. При достижении температурного минимума в мезосфере наблюдалось резкое падение интенсивности внутренних гравитационных волн с периодами 10-60 мин в верхней ионосфере, тогда как для волн больших периодов эффект отсутствовал. Эффект изменения интенсивности внутренних волн интерпретирован как обусловленный фильтрацией и/или повышенной турбулентностью вблизи мезопаузы.

Проведен анализ оптимальных условий прохождения внутренних гравитационных волн (ВГВ) из тропосферы в ионосферу при наличии неоднородных по вертикали зональных ветров с генерацией в ионосферной плазме индикаторов кризисных процессов. Численные расчеты показали, что оптимальные условия прохождения ВГВ на ионосферные высоты для различных вертикальных профилей частоты Ваясья-Брента и зонального ветра реализуются для достаточно больших горизонтальных длин волн, когда в атмосфере отсутствуют критические слои, блокирующие распространение ВГВ на высоты порядка 90 км и более.

26. Широкополосное резонансное удвоение частот радиоволн в условиях фазового синхронизма волны накачки и её второй гармоники при косом распространении первой гармоники.

Рассмотрен эффект нелинейной электродинамики неоднородной магнитоактивной плазмы – широкополосное резонансное удвоение частот радиоволн в условиях фазового синхронизма волны накачки и её второй гармоники при косом (к внешнему магнитному полю) распространении первой гармоники. Проведен анализ возможностей возникновения синхронизма первой и второй гармоник в плавно неоднородной плазме в зависимости от угла между внешним магнитным полем и волновым вектором первой гармоники. Показано сильное повышение эффективности генерации второй гармоники в случае, когда частота первой гармоники близка к половине циклотронной частоты

нерелятивистских электронов плазмы. Рассмотрены оптимальные условия генерации второй гармоники в ионосферной плазме. Анализ показал, что довольно часто прохождение первой гармоники в область ее синхронизма со второй гармоникой определяется эффективностью преодоления слоя непрозрачности, который однако может быть сравнительно узким. Данный эффект важен для приложений в дистанционной нелинейной диагностике плазмы верхней ионосферы. Отмечена возможность просветления неоднородной плазмы за счет генерации второй гармоники электромагнитной волны, которая может распространяться через области непрозрачности для первой гармоники. На основе проведенных расчетов заканчивается подготовка статьи для публикации в журнале «Физика плазмы».

27. Анализ генерации быстрых электронов и гамма излучения при разрядах в грозовой облачности.

Методами физической кинетики по эмпирически известному виду (форме) функции распределения заряженных частиц в плазме найдены соответствующие ей интегралы столкновений, реконструирован неизвестный закон их взаимодействия. Это важно, например, для проблемы возникновения гамма-вспышек в грозовых разрядах, для которых параметры наблюдаемых спектров, как известно, от электрического поля разрядов. Значит механизм формирования функции распределения излучающих электронов пока не изучен, но ее форма может быть найдена, если в расчетах принять тормозной механизм гамма-излучения.

Использовано важное свойство диэлектрической проницаемости (ДП) плазмы как объективной характеристики среды: она не должна зависеть от того из каких уравнений вычисляется. Например, ДП плазмы, вычисленная из уравнений для флуктуаций функции распределения частиц (уравнения Дюпри), должна быть тождественна ДП, вычисленной из линейных по полю уравнений для добавок к этим функциям. Если это не выполняется, то один из указанных выше подходов ошибочен. Методов линеаризации кинетических уравнений два, и один из них – известный метод «вторичной линеаризации нулевого (по полю) приближения» - такой тождественности не обеспечивает (в отличие от другого – флуктуационного метода). Таким образом в рассматриваемой задаче необходимо использовать флуктуационный метод.

28. Исследование процессов самоорганизации мелкодисперсных частиц и плазмы в системе солнечный ветер-Луна, анализ и моделирование волновых процессов в пылевой плазме у Луны.

Проведен анализ процессов, важных при отрыве пылевых частиц от поверхности Луны. Показано, что существенными процессами, которые следует учитывать при формировании плазменно-пылевой системы, являются когезия и адгезия. Продемонстрировано, что силы когезии и адгезии на Луне зависят, в частности, от присутствия адсорбированных слоев и шероховатости частиц и поверхностей. С учетом указанных эффектов получены выражения для сил когезии и адгезии, на основе которых проведен анализ эффектов когезии и адгезии для частиц лунной пыли. Показано, что хотя эффект шероховатости обуславливает ослабление на два-три порядка интенсивности эффектов когезии и адгезии, для преодоления сил когезии и адгезии при отрыве пылевых частиц от поверхности Луны существенное значение имеет механическое воздействие на частицы. Механическое воздействие обусловлено, в частности, нагревом пылевых частиц солнечным излучением и последующим их охлаждением, приводящими к изменению линейных размеров пылевых частиц с последующим увеличением или уменьшением давления друг на друга, ударами метеороидов о поверхность Луны и т.д. Проведены оценки возможности отрыва пылевых частиц от поверхности Луны вследствие ударов

микрометеороидов о поверхность Луны. Показано, что данный эффект играет существенную роль и должен быть учтен при определении количества частиц, поднимающихся над поверхностью Луны при формировании плазменно-пылевой системы. Для различных высот над Луной найдены значения среднего числа частиц реголита, покидающих лунную поверхность вследствие ударов высокоскоростных метеороидов о лунную поверхность.

Проведено исследование влияния солнечного ветра на немонотонное 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, небогатых водородом, для которых работа выхода фотоэлектронов под действием солнечного излучения значительно выше, чем для участков, богатых водородом. Проведено теоретическое исследование и численное моделирование волновых и коллективных процессов в плазменно-пылевой системе Земля-Луна. Показано, что движение частиц солнечного ветра по отношению к фотоэлектронам над лунной поверхностью приводит к развитию неустойчивости, в результате чего происходит генерация высокочастотных электростатических колебаний с частотами, находящимися в диапазоне частот ленгмюровских и электромагнитных волн. Продемонстрировано, что не существует факторов, запрещающих возбуждение пылевых звуковых волн над поверхностью Луны, генерация которых возможна, в частности, в области лунного терминатора. Найдены также решения в виде пылевых звуковых солитонов в приповерхностном слое Луны и определены свойства указанных солитонов.

Показано, что в окрестности лунного терминатора существует область, которая представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в плазме. В области терминатора возникают электрические поля с напряженностью $E \sim 300$ В/м, которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Предложенный эффект может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor.

29. Разработка теоретических представлений, анализ физических механизмов и моделирование нелинейных волновых процессов и переноса мелкодисперсных пылевых частиц в запыленных областях атмосферы Земли и Марса.

Разработана самосогласованная физико-математическая модель, описывающая пылевые облака в атмосфере Земли и их проявления. Создан алгоритм для самосогласованного расчета модификации атмосферы в присутствии пылевых облаков в приповерхностных областях. Входными параметрами для расчетов являются географические координаты облаков, сезонное и суточное время, данные о составе аэрозольных частиц облаков и их распределений по размерам. Результаты расчетов включают в себя радиационные (плотность потока излучения в различных диапазонах длин волн) и газодинамические (температура, концентрации малых газовых составляющих атмосферы) параметры атмосферы в присутствии пылевых облаков. На основе разработанной модели проведено исследование, характеризующее роль и радиационные проявления мелкомасштабного аэрозоля над регионом Центральной Азии. Показано, что при нарушениях радиационного фона в климатической системе происходит перераспределение энергии, вследствие чего возникают погодные (климатические) аномалии, в которых важную роль играет

аэрозольное загрязнение атмосферы. Наибольший радиационный эффект аэрозоля в атмосфере Центральной Азии достигается в присутствии Атмосферных Коричневых Облаков (АКО). Проведены расчеты изменения температурного режима атмосферы в условиях изменения влажности и концентраций аэрозолей в присутствии АКО. Показано, что АКО являются существенным фактором регионального и глобального потепления. Исследован механизм формирования неоднородностей концентраций электронов и ионов в запыленной ионосфере в результате развития модуляционного взаимодействия электромагнитных волн, связанного с возбуждением возмущений, имеющих частоты в области пылевых звуковых волн. Получена оценка неоднородностей концентраций электронов на основе вычислений, проведенных для случая спектров электромагнитного излучения нагреваемых стенов на высотах 80 км и 100 км. Показана возможность возбуждения достаточно интенсивных неоднородностей электронной и ионной концентраций в ионосфере в результате развития модуляционного взаимодействия.

Сформулирована физико-математическая модель, описывающая динамику многокомпонентной сплошной среды с учетом пылевой примеси, нейтральной и заряженной компонент. Определена устойчивость решения к слабым возмущениям в неадиабатической атмосфере с учетом локальных особенностей температурного профиля атмосферы, таких как понижение температуры в полярной мезопаузе и внезапные стратосферные потепления. Показано, что температурные аномалии приводят к появлению дополнительных областей неустойчивости в атмосфере, определены значения волновых чисел, при которых условия неустойчивости выполняются. Определены зоны неустойчивости и условия развития нелинейных возмущений в пространстве волновых чисел. Показано, что в результате развития модуляционной неустойчивости в запыленной ионосферной плазме возможно формирование локальных пылевых потоков, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях (зональных потоков). Разработана физико-математическая модель для описания поведения пылевых частиц в пылевых вихрях (dust devils). На основе этой модели проведены расчеты траекторий пылевых частиц в пылевых вихрях на Марсе и на Земле с учетом влияния электрического поля. Показано, что влияние электрического поля оказывается существенным вблизи поверхности планеты в области захвата пылевых частиц. Вдали от указанной области электрическое поле не оказывает значительного влияния на траекторию пылевой частицы. Показано, что при расчете траектории пылевой частицы в пылевом вихре вдали от центра вихря электрическое поле, генерируемое вихрем, может быть аппроксимировано полем электрического диполя, расположенного на оси симметрии вихря, на половине его высоты. Проведенные расчеты показывают, что пылевые вихри являются важным источником пыли в атмосферах Земли и Марса.

30. Метод крупных вихрей в сжимаемой конвекции

Разработан метод крупных вихрей для исследования сжимаемой турбулентной конвекции космической плазмы, основанный на коде ANTARES. В методе используется параметризация Смагоринского для турбулентной вязкости. Также разработана и реализована подсеточная модель уравнения магнитной индукции методом крупных вихрей, основанной на идеях Смагоринского. В методе крупных вихрей исходные уравнения отфильтровываются. Операция фильтрации может быть явной или неявной. В нашем проекте мы решили использовать неявную фильтрацию, так как такой способ существенно упрощает численные расчеты сложных турбулентных течений. Это особенно важно в вычислительной астрофизике, так как внешние силы играют важную роль в таких течениях. В неявном методе оператор фильтра является разностной дискретизацией и в этом случае отфильтрованные масштабы меньше, чем шаг сетки. Отфильтрованная система уравнений магнитной гидродинамики включает неизвестные тензоры напряжений. В нашем подходе мы рассматриваем исходные уравнения на конечных

масштабах и дополняем их слагаемыми, описывающими подсеточные тензоры напряжений. Для подсеточной модели напряжений в уравнении магнитной индукции сформулирована модель Смагоринского. Проверено, что такая параметризация может быть использована в коде ANTARES путем добавления турбулентной магнитной вязкости. Параметризация реализована в коде и осуществлены тестовые расчеты, показывающие применимость разработанного метода крупных вихрей. Полученные результаты обеспечивают уникальную возможность изучения турбулентной конвекции при реалистичных числах Прандтля, а также для изучения солнечных осцилляций при наличии магнитного поля.

31. Параметрические неустойчивости в магнитной гидродинамике астрофизической плазмы в приближении мелкой воды

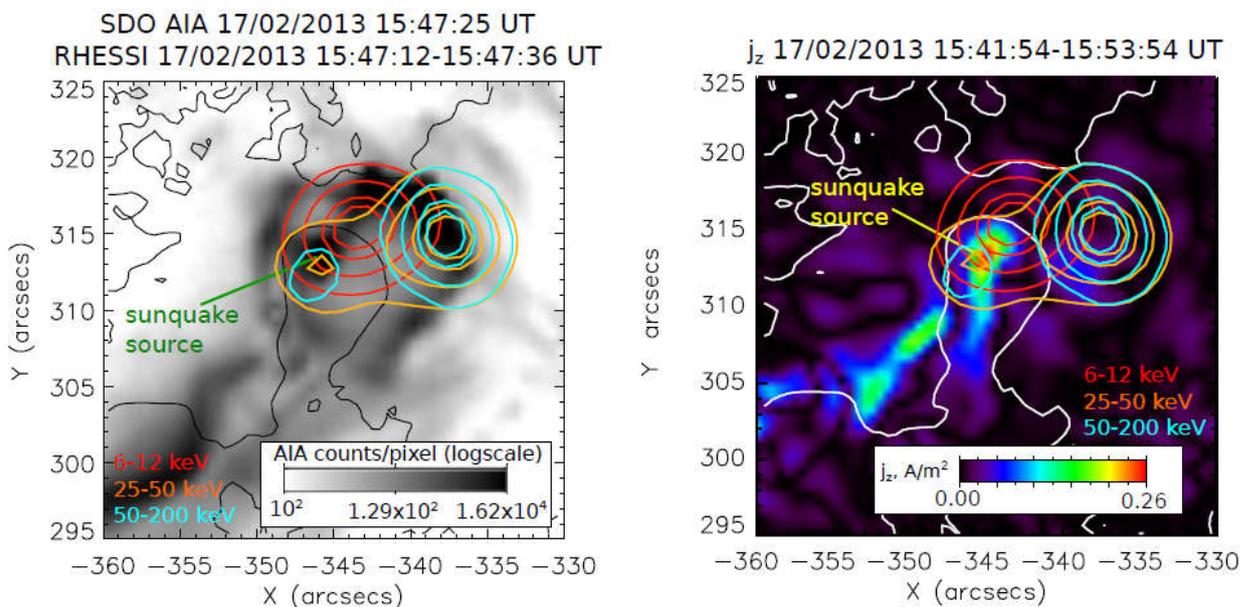
Изучены вращающиеся магнитогидродинамические течения тонкого слоя астрофизической плазмы со свободной границей в вертикальном внешнем магнитном поле. Мы используем приближение мелкой воды. Наличие вертикального внешнего магнитного поля присуще атмосферам нейтронных звезд. В рассматриваемом случае имеют место трехволновые нелинейные взаимодействия. Асимптотическим методом многомасштабных разложений выведены нелинейные уравнения взаимодействия волновых пакетов: взаимодействие трех магнито-Пуанкаре волн, взаимодействие трех магнитострофических волн, взаимодействие двух магнито-Пуанкаре и одной магнитострофической волны, а также двух магнитострофических и одной магнито-Пуанкаре волн. Найдено, что существуют следующие типы распадных неустойчивостей: магнито-Пуанкаре волна распадается на две магнито-Пуанкаре волны, магнитострофическая волна распадается на две магнитострофические волны, магнито-Пуанкаре волна распадается на одну магнито-Пуанкаре волну и одну магнитострофическую, магнитострофическая волна распадается на одну магнитострофическую и одну магнито-Пуанкаре волну. Показано что имеются следующие механизмы параметрического усиления: параметрическое усиление магнито-Пуанкаре волн, параметрическое усиление магнитострофических волн, а также усиление магнито-Пуанкаре волны в поле магнитострофической и усиление магнитострофической волны в поле магнито-Пуанкаре волны. Найдены инкременты неустойчивостей и коэффициенты параметрического усиления для соответствующих процессов.

Раздел 2.2 Экспериментальные исследования.

Руководитель чл.-корр. А.А. Петрукович

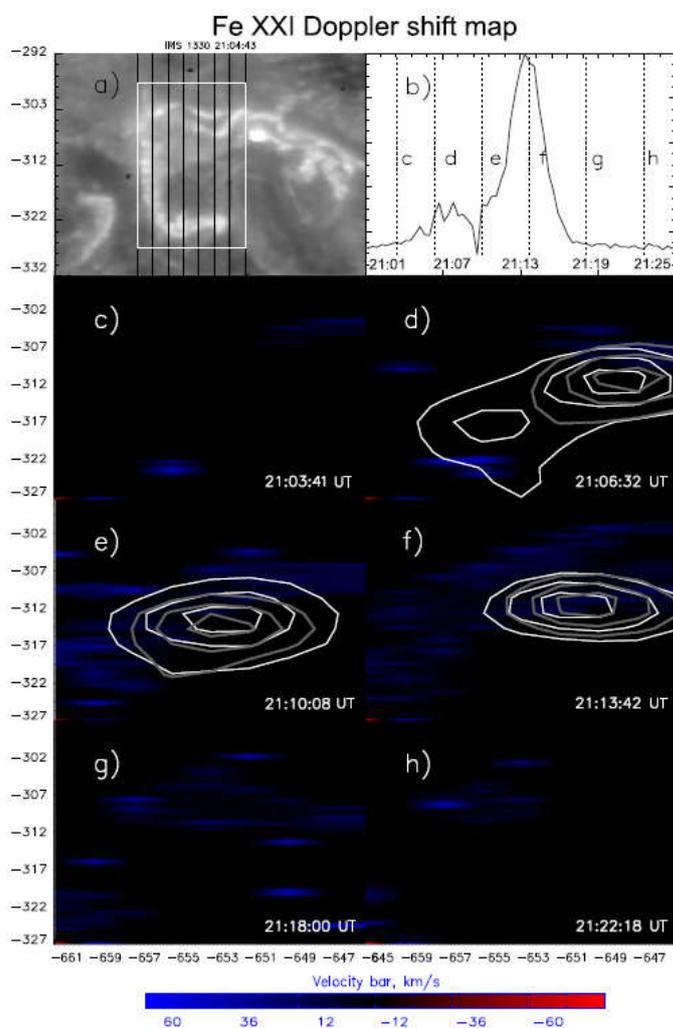
1. Гелиосейсмическое возмущение и электрические токи

Впервые наблюдалась гелиосейсмическое возмущение во вспышке С класса. Вспышка С7.0 17 февраля 2013 г. является первым событием С класса, в котором наблюдалось гелиосейсмическое возмущение. Для его анализа были использованы данные наблюдений инструментов AIA и HMI/SDO (изображения активной области, доплерограммы и измерения вектора магнитного поля) и КА RHESSI и GOES (рентгеновское излучение). Показано, что место генерации гелиосейсмического возмущения соответствует наиболее сильным электрическим токам во вспышечной области и слабому источнику жесткого рентгеновского излучения, а вспышечное энерговыделение коррелирует по времени с динамикой усредненного вертикального электрического тока и горизонтального электрического поля. Это противоречит стандартной теории гелиосейсмического возмущения, в которой оно является откликом солнечной атмосферы на импульсный нагрев ускоренными электронами. Наблюдения солнечная вспышки М9.3 30 июля 2011 г. также показывают, что область генерации гелиосейсмического возмущения совпадает со слабым источником жесткого рентгеновского излучения, во время вспышечного процесса происходит перестройка течений плазмы фотосферы около линии инверсии магнитного поля.



2. Хромосферное испарение и потоки в солнечной вспышке по наблюдениям IRIS

Проанализирован процесс хромосферного испарения и динамика потоков плазмы в солнечной вспышке M1.0 по данным КА IRIS. Анализ данных IRIS солнечной вспышки M1.0 12 июня 2014 показал доплеровское смещение различных спектральных линий, свидетельствующее о потоках вещества на различных стадиях вспышки. Перед вспышкой наблюдалось сильное красное смещение, напоминающие струйные потоки хромосферного вещества с скоростью 100 км с^{-1} . Сильное нетепловое излучение линии C II к 1334.5 \AA из переходной области хромосфера-корона наблюдалось в начале импульсной фазы в нескольких точках размером порядка $1''$. Также найдено, что линия C II к имела красное смещение в разных точках активной области как до, так во время и после импульсной фазы вспышки. Пик интегрального излучения горячей плазмы ($1.1 \cdot 10^7 \text{ K}$) в линии Fe XXI 1354.1 \AA зарегистрирован через 5 минут после пика низкотемпературной линии C II к. Сильное голубое смещение линии Fe XXI в активной области соответствует испарению горячей хромосферной плазмы со скоростью 50 км с^{-1} . Данные RHESSI показывают, что динамика верхней хромосферы, наблюдавшаяся IRIS, соответствует режиму мягкого испарения в результате нагрева хромосферы как ускоренными электронами, так и тепловым потоком из области вспышечного энерговыделения.

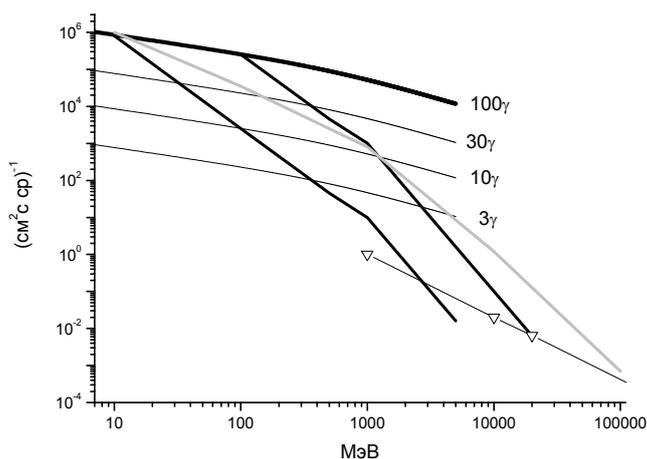


Изображение активной области (панель a), доплерограммы (панели c-h) построены внутри белого прямоугольника (панель a) для моментов времени c-h (панель b). Источник рентгеновского излучения Белые (12-25 кэВ) и серые (6-12 кэВ) линии.

3. Предельный спектр и флюенс солнечных космических лучей

Сделана оценка предельного спектра интенсивностей и флюенсов солнечных/звездных космических лучей (СКЛ) в некоторой точке гелиосферы (звездной сферы) на основе характерных величин магнитного поля и линейных размеров активной области.

Предполагается, что спектр в источнике соответствует спектру Сыроватского (1961) для релятивистских и нерелятивистских СКЛ. Спектр СКЛ нормируется на спектр равенством магнитного давления солнечного ветра и давления газа СКЛ (Freier&Webber, 1963). Характерные времена набора флюенса при диффузионном и конвективном распространении СКЛ, полученные из наблюдений наиболее мощных событий, используются для оценки предельных флюенсов. Оценка предельного флюенса протонов >30 МэВ для одиночного события согласуется наблюдательным верхним пределом. Найденные предельные спектр интенсивностей и флюенсов могут быть использованы для оценки генерации радионуклеидов в атмосфере Земли и экзопланет в экстремальных протонных событиях.



Предельный спектр СКЛ на орбите Земли (мягкий и жесткий) – черные линии. Горизонтальные линии – предельные потоки CRK при различных величинах ММП. Серая линия – предельный спектр СКЛ (Мирошниченко и др., 2013). Открытые треугольники – спектр ГКЛ.

4. Исследование коронального радиовсплеска II типа с несколькими частотными полосами

Исследованы источники излучения коронального радиовсплеска II типа с тремя спектральными полосами в эруптивном солнечном событии 16 февраля 2011 г. с использованием данных наблюдений радиогелиографа Нансе и УФ телескопа AIA/SDO. Показано, что расположение источников первой и второй полос радиовсплеска относительно коронального выброса массы (КВМ) не противоречит возможности генерации излучения впереди и позади поршневой ударной волны, возбуждаемой КВМ, распространяющегося в “магнитной воронке” на стыке двух систем магнитных петель. Третья полоса излучения при этом может быть следствием ускорения электронов при взаимодействии фланга КВМ с одной из систем петель. Однако на основе анализа имеющихся наблюдений нельзя также исключить возможность, что две первые полосы радиовсплеска могут быть следствием импульсного взаимодействия КВМ со стримером, располагавшимся на пути его распространения.

5. Статистическое исследование механизмов возбуждения изгибных колебаний корональных магнитных петель

Исследовано 58 событий в солнечной короне, в которых по данным AIA/SDO в 2010-2014 гг. наблюдалось возбуждение затухающих изгибных колебаний магнитных петель. Установлено, что основным (55 случаев) механизмом возбуждения колебаний петель является их отклонение от положения равновесия при взаимодействии с эруптивными магнитоплазменными структурами (жгутами) или коллимированными выбросами плазмы (джетами). В трех оставшихся событиях не удалось однозначно установить механизм возбуждения колебаний петель в силу ограниченности наблюдательных данных. По всей

видимости, ударные волны, если и играют какую-то роль в возбуждении колебаний петель, то не основную.

6. Анализ данных по рентгеновскому излучению Солнца в диапазоне энергий от 1 до 15 кэВ, механизмов возникновения спектральных особенностей и нагрева солнечной короны.

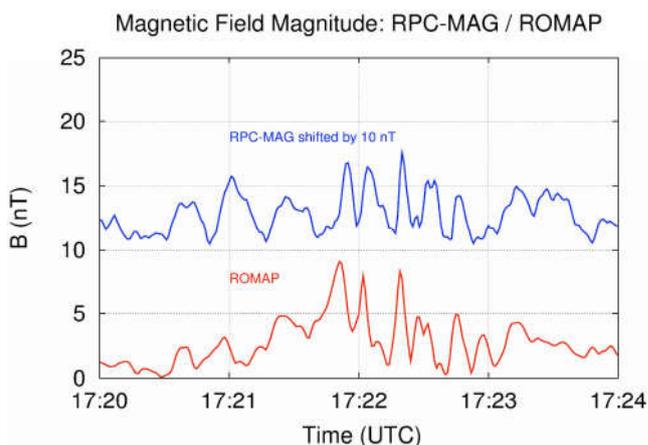
Выполнены исследования особенностей рентгеновского излучения и явления падения интенсивности рентгеновского излучения микровспышек солнечной короны в диапазоне энергий (2 –15) кэВ. Обнаружено падение, а в некоторых случаях, и увеличение интенсивности рентгеновского излучения микровспышек и теплового фона солнечной короны в узких поддиапазонах рентгеновского спектра от 3 до 11 кэВ на спокойном Солнце. Результаты представляют интерес, например, для развития современных моделей нагрева солнечной короны и корректной интерпретации экспериментальных данных по процессам в солнечной короне.

7. Анализ данных по исследованию взаимодействия солнечного ветра с атмосферами планет.

Проанализированы результаты проведенных космических экспериментов у Марса, которые были осуществлены в 1970х спутниках Марса Марс-2, -3 и -5 в 1980х годах на спутнике Фобос-2. По этим и более поздним исследованиям на европейском спутнике Mars-Express отождествлены и проанализированы три основных источника атмосферных потерь Марса, индуцированные солнечным ветром: захват экзосферных ионов потоком солнечного ветра (массовая нагрузка) ускорение в плазменном слое и ускользание ионосферных ионов. По этим данным определена средняя величина потерь тяжелых атмосферных ионов и показано, что высокая солнечная активность приводит к значительному увеличению этих потерь. Определенная величина средних потерь в современных условиях составляет около 0.5 кг/с. Эта величина показывает, что индуцированные солнечным ветром потери атмосферы Марса привели к катастрофическим последствиям и являются причиной того, что Марс потерял большое количество воды и своей атмосферы. Сравнение экспериментальных данных с численными моделями показали, что определенная с помощью этих моделей величина атмосферных потерь в несколько раз меньше среднего экспериментального значения.

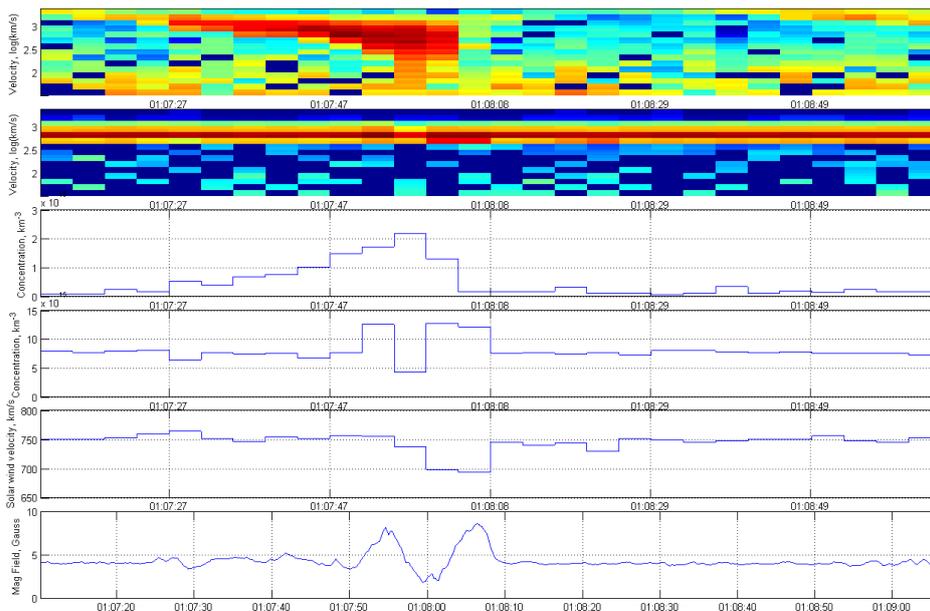
8. Обнаружение отсутствия намагниченности ядра кометы 67/Р Чурюмова-Герасименко.

Сведения о намагниченности тел солнечной системы важны для понимания их эволюции и происхождения, а так же условий в солнечной туманности в то время. По данным измерений магнитного поля во время спуска и последующих многократных касаний поверхности кометы 67/Р Чурюмова-Герасименко зондом Филы миссии Розетта, в пределах погрешности анализа обнаружено отсутствие глобального магнитного поля ядра кометы. На рис. 1 показаны в значительной степени совпадающие результаты одновременных измерений магнитного поля на КА Розетта магнетометрами RPC-MAG (синяя кривая, сдвинутая для удобства анализа на 10 нТ) и РОМАП. Датчики комплекса аппаратуры РОМАП измерили что магнитное поле ядра в нескольких местах касаний Филы его поверхности не превышало 2 нТ, что соответствует верхнему пределу намагниченности валунов метрового размера $< 3.1 \times 10^{-5} \text{ А м}^2 \text{ кг}^{-1}$. Максимальный дипольный момент кометы 67/Р в таком случае составляет $1.6 \times 10^8 \text{ А м}^2$. Это позволяет сделать вывод, что упорядочение магнитным полем в препланетной туманности играло малую роль на масштабах $\sim 1 \text{ м}$.



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

Проведён анализ события, зарегистрированного группировкой CLUSTER 22.02.2006. Событие было зарегистрировано четырьмя аппаратами, что дало широкие возможности для обработки данных из различных областей события. По данным четырёх аппаратов была построена предполагаемая геометрия процессов взаимодействия токового слоя и ударной волны в области регистрации события, включающая в себя ориентацию токового слоя, оценки его скорости смещения по ударной волне, определение геометрии ударной волны и магнитного поля. Так же, по данным четырёх аппаратов были проведены оценки электрических полей вблизи токового слоя, зарегистрированного при наблюдении события, на основании характера распределения частиц разных популяций плазмы, оценок Ларморовского радиуса для частиц в наблюдаемых условиях и оценок электрических полей был предложен предварительный сценарий формирования исследуемого образования. Анализ функции распределения частиц в пространстве скоростей по данным двух аппаратов позволил выделить различные популяции плазмы – плазма солнечного ветра и отраженный пучок. При раздельном анализе этих компонентов были выявлены особенности распределений, которые могут дать информацию о процессе формирования образования.



Спектрограммы энергия – время отраженного пучка (вверху), солнечного ветра, плотности отраженного пучка, плотности солнечного ветра, скорости солнечного ветра и величины магнитного поля.

10. Геоэффективность корональных дыр в 2006-2010 г.

Проведено сопоставление динамики общей площади низкоширотных корональных дыр с динамикой скорости солнечного ветра, показано близкое подобие временных профилей этих величин в 2007-2009 г.: уменьшение площади сопровождается уменьшением скорости СВ. Для этого периода найдена почти 100% корреляция 26-дневных вариаций полной площади низкоширотных корональных дыр и 26-дневных вариаций скорости СВ.

11. Защита космических аппаратов от ионизирующих излучений

Рассмотрены методы расчета оптимальной защиты от воздействия радиации на элементы космического аппарата и экипаж. Рассмотрены возможные дозовые нагрузки от частиц СКЛ, ГКЛ и частиц радиационного пояса Земли. Показано, что оптимальной защитой для электронной аппаратуры КА от всех видов ионизирующих излучений является экран массовой толщиной около $2,5 \text{ г/см}^2$ из алюминия. При полете к Луне оптимальной защитой космонавтов является экран масовой толщиной около 20 г/см^2 из алюминия. При полете к Марсу оптимальной защитой космонавтов является экран массовой толщиной около 40 г/см^2 из алюминия.

12. Формирование периодических структур в потоках солнечного ветра и в магнитосфере Земли в период минимума солнечной активности 2006-2010 гг.

Показано, что распределение мощности среди гармоник периодической структуры высокоскоростных потоков солнечного ветра связано долготно-широтным распределением корональных дыр в солнечной короне. Рассмотрена связь периодических структур, выделенных в геомагнитных Dst и Kp индексах и в потоках электронов $> 0,6 \text{ МэВ}$ внешнего радиационного пояса с динамикой и структурой потоков солнечного ветра.

13. Исследование средней динамики возмущенных крупномасштабных типов солнечного ветра

Впервые выполнено исследование усредненных временных профилей 20-ти параметров плазмы и магнитного поля в возмущенных крупномасштабных типах солнечного ветра (СВ): коротирующих областях взаимодействия (CIR), в межпланетных выбросах коронарных масс (ICME) (как в магнитных облаках (MC), так и в поршнях (Ejecta), и в областях сжатия (Sheath), в том числе с учетом межпланетных ударных волнах (IS). Поскольку длительности типов СВ разные, мы используем разработанный нами двойной метод наложения эпох (DSEA): масштабируя длительности интервалов для всех типов СВ таким образом, чтобы начало и конец для всех интервалов выбранного типа совпадали. Главный вывод заключается в том, что поведение параметров в Sheath и в CIR очень похоже, как качественно, так и количественно. И высокоскоростное течение (HSS), и быстрый ICME играют роль поршня, который толкает и сжимает плазму перед собой. Возрастание скорости HSS и ICME приводит сначала к формированию областей сжатия (CIR и Sheath, соответственно), и затем к IS. Появление областей сжатия и IS увеличивает вероятность магнитосферной активности.

14. Определение характеристик турбулентности быстрых флуктуаций скорости и плотности ионов плазмы в области высоких частот в солнечном ветре.

Впервые получены характеристики турбулентности с помощью измерений флуктуаций параметров солнечного ветра в диапазоне 0.03-100 сек. с рекордно высоким временным разрешением (до 0.03 с) с помощью плазменного спектрометра БМСВ на высокоапогейном спутнике «Спектр-Р» на дальностях вплоть до 350 тыс. км от Земли. При этом выявлены различия в наклонах низко- и высоко-частотной ветвях спектра и найдена зависимость величины граничной частоты между этими ветвями от условий в солнечном ветре. Статистические свойства флуктуаций проанализированы на шкале менее 10 сек. и найден высокий уровень их перемежаемости. Аппроксимация не-гауссовской функции распределения флуктуаций ионного потока Цаллиевской статистикой показывает нерасширенный характер СВ-флуктуаций, хорошо описываемый предсказаниями лог-Пуассоновской модели с волокно-подобной структурой, как правило, наблюдаемой в турбулентном течении плазмы.

15. Модификация структур плазмы при прохождении их из солнечного ветра в магнитослой через околосолнечную ударную волну.

По результатам многочисленных одновременных наблюдений параметров плазмы на двух близко расположенных спутниках, один из которых находится в солнечном ветре, а другой - в магнитослое, установлено, что при переходе из СВ в МСЛ характеристики хорошо выраженных и больших структур солнечного ветра не остаются неизменными и, хотя в них сохраняются довольно резкие границы, но амплитуда фронтов по плотности плазмы несколько увеличивается, в среднем, на 30-50 %, амплитуда фронтов по модулю магнитного поля увеличивается гораздо больше, в среднем, в 2.5 раза, а длительность фронтов возрастает, в среднем, на 40 %.

16. Особенности вариаций величины и направления вектора потока ионов солнечного ветра в области сравнительно высоких частот - до 10 Гц.

Впервые исследованы быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра, измеренные с помощью прибора БМСВ на спутнике «Спектр-Р» с рекордно высоким временным разрешением в 30 мсек. В отличие от прежних работ, изучавших подобные вариации в диапазоне нескольких десятков секунд или даже нескольких минут, в данной работе показано, что направление потока ионов солнечного

ветра может испытывать вариации столь большие как в масштабе нескольких градусов и столь быстрые как в пределах нескольких секунд.

17. Изучение развития перемежаемой турбулентности в солнечном ветре и магнитосферных погранслоях по многоспутниковым данным и сравнение с характеристиками турбулентности в других средах.

Подтверждена универсальность свойств турбулентности в погранслоях: (i) обобщенное самоподобие; (ii) супердиффузия; (iii) доминирование нитевидных филаментарных структур в процессах диссипации; (iiii) развитие и релаксация перемежаемости в погранслоях. Проведен обзор последних экспериментальных, теоретических, численных и статистических исследований в области перемежаемой турбулентности космической и лабораторной плазмы. Впервые проведено сравнение с новыми данными по гидромагнитной турбулентности в аэродинамических трубах, впервые использованы данные потока плазмы в погранслое земной магнитосферы со спутника СПЕКТР-Р с рекордным временным разрешением и максимальной длительностью нахождения спутника в погранслое магнитосферы, что позволило опуститься до частоты 0.02 МГц и обнаружить неизвестные до сих пор магнитосферные резонансы (см. левый рис.). Показана универсальность свойств перемежаемой турбулентности как в космической и лабораторной плазме, так и в гидродинамических течениях. Наблюдаются свойства расширенного самоподобия, а характер переноса в погранслоях соответствует супердиффузии: $\langle x^2 \rangle \sim \tau^{1.2-1.8}$, где $\langle x^2 \rangle$ - среднеквадратичное смещение частицы в турбулентном поле, а τ - время смещения.

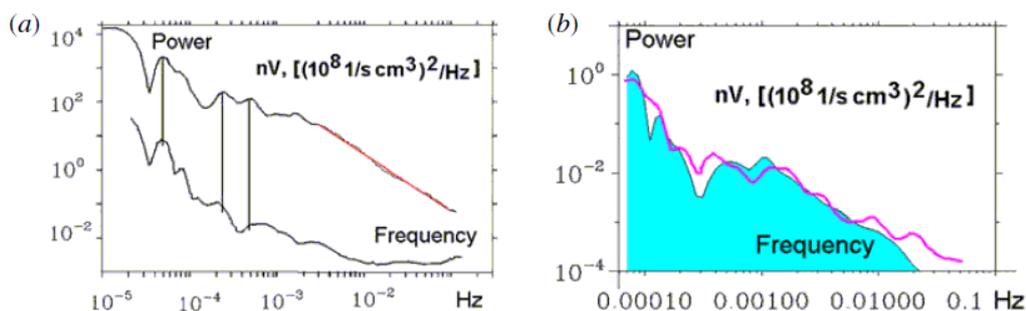


Рис. Данные потока плазмы в погранслое магнитосферы Земли, (прибор БМСВ на СПЕКТР-Р 20.03.2012 г., WIND (нижняя кривая на левом рис., солнечный ветер) и CLUSTER-4 (толстая фиолетовая кривая). В погранслое Земли происходит как усиление на 3 порядка низкочастотных колебаний в солнечном ветре на резонансах (вертикальные линии), так и накачивание энергии на частотах до 3 Гц с наклоном около -1). Без перемежаемости в солнечном ветре, она возникает перед ударной волной за счет, отраженных от ударной волны ионов, максимизируется вблизи ударной волны, и релаксирует в погранслое ближнего хвоста магнитосферы (СПЕКТР-Р).

18. Быстрые вариации потока энергичных ионов вблизи околоземной ударной волны

По наблюдениям проектов Спектр-Р/Плазма-Ф (прибор МЭП) и THEMIS (SST) обнаружены быстрые вариации потоков энергичных ионов вблизи околоземной ударной волны, как в солнечном ветре, так и в магнитослое с периодами 10 – 30 секунд в широком диапазоне энергий от 4 кэВ до нескольких сотен кэВ. Построен каталог более сотни событий. Синхронность колебаний на разных энергиях не позволяет соотнести данный феномен с ранее описанными явлениями резонансного взаимодействия отраженных ионов с фронтом ударной волны. Колебания обычно наблюдались в форшоке наклонной ударной волны при повышенной скорости солнечного ветра.

19. Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках

Рассмотрены возможности исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках. Представлены варианты актуальных научных задач, готовящиеся проекты. Выпущены материалы конференции.

20. Частотные спектры вариаций потоков ионов солнечного ветра в солнечном ветре и в магнитослое.

На основе измерений величины и направления потоков ионов СВ с рекордно высоким временным разрешением (30 мсек.) были впервые определены частотные спектры их вариаций (как величины потока, так и полярного угла) и в солнечном ветре, и в магнитослое в диапазоне сравнительно высоких частот (ранее неизученном) – вплоть до 10 Гц. Было показано, что в подавляющем большинстве случаев эти спектры имеют две ветви с разными показателями наклона – низкочастотную ветвь (с более медленным спадом) и высокочастотную ветвь (с более крутым спадом) с граничной частотой между ними в диапазоне около 1 Гц. При этом наклоны указанных ветвей в СВ и в МСЛ довольно схожи, а вот значения граничной частоты в них существенно (примерно в 2 раза) отличаются – в магнитослое граничная частота примерно вдвое меньше, чем в солнечном ветре.

21. Воздействие на магнитосферу резких и быстрых изменений параметров солнечного ветра.

Показано, что резкие и быстрые изменения параметров солнечного ветра и, в первую очередь, возрастания его плотности приводят не только к сжатию магнитосферы, что уже сравнительно хорошо известно, но и к возбуждению быстрых вариаций геомагнитного поля (всплесков) в довольно широком диапазоне частот (прежде всего - в подсолнечной области магнитосферы, но, в ряде случаев, и глобальных – во всей магнитосфере), изученных нами. Были рассмотрены несколько таких событий и построены динамические спектры наблюдавшихся геомагнитных всплесков. Большой интерес представляет таймирование этих всплесков по отношению к источнику возмущения – резкому и большому возрастанию потока ионов солнечного ветра, идентифицируемому с хорошим временным разрешением с помощью нашего прибора БМСВ на спутнике «Спектр-Р».

При этом полученные временные соотношения между наблюдавшимися всплесками геомагнитного поля и исходным источником возмущения - резким импульсом потока ионов - представляются совсем непростыми и требуют дальнейшего детального анализа, который будет продолжен.

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

С использованием результатов 3D МГД моделирования обтекания магнитопаузы солнечным ветром и аналитического решения МГД уравнений в Лагранжевых переменных построены аналитические выражения, описывающее полное Π , тепловое P_{th} и магнитное P_{mag} давления набегающего потока плазмы в точке его остановки:

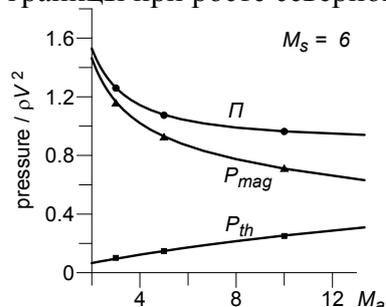
$$\Pi = k\rho V^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6} \cdot \sin^2 \vartheta_{bv}}{M_a^2} \right)^{2/3} \right), \quad P_{th} = k\rho V^2 / \left(1 + 25 \sqrt{\frac{\sin^2 \vartheta_{bv}}{M_a^2}} \left(2 - \sqrt{\frac{6}{M_s}} \right) \right), \quad P_{mag} = \Pi - P_{th},$$

где M_s и M_a – звуковое и Альвеновское числа Маха, соответственно, ϑ_{bv} - угол между направлениями солнечного ветра и межпланетного магнитного поля,

$$k = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \left(\gamma - \frac{\gamma-1}{2M_s^2} \right)^{1/(1-\gamma)} \quad \text{и } \square - \text{показатель адиабаты.}$$

На Рис. показано соответствие приведенных выше аналитических выражений (сплошные кривые) результатам МГД моделирования.

С использованием решения уравнения Лапласа в эллипсоидальных координатах получено простое аппроксимирующее выражение для “фактора удвоения” f_d магнитного поля в подсолнечной точке геомагнитопаузы в зависимости от ее формы. Качественно объяснено “быстрое” приближение к Земле и “затупление” магнитопаузы при росте южной компоненты ММП, и “медленное” перемещение магнитопаузы от Земли и “сужение” этой границы при росте северной компоненты ММП.



23. Определение изменений характеристик энергетических спектров частиц в магнитосфере Земли в зависимости от геоцентрического расстояния (событие 18 июля 2007 г.)

Проведен анализ характеристик спектров частиц измеренных в пятиспутниковом проекте THEMIS. Проведен анализ эволюции показателя спектра всенаправленного дифференциального потока протонов (в диапазоне от 40 до 600 кэВ) при пересечении магнитопаузы вблизи подсолнечной точки событие 18 июля 2007 г. Показано, что вблизи магнитопаузы наблюдается высокий уровень флуктуаций показателя спектра энергичных ионов. Амплитуды флуктуаций превышали 1-2 единицы в районе магнитослоя, магнитопаузы и низкоширотного погранслоя. Уровень флуктуаций значительно уменьшается внутри магнитосферы. Показатель степени при этом в среднем имеет величину ~ 6 и остается постоянным вплоть до внутренних областей магнитосферы. Наблюдалось уменьшение амплитуд флуктуаций при вхождении во внутренние слои магнитосферы и уменьшение усредненной величины показателя степени до 5.

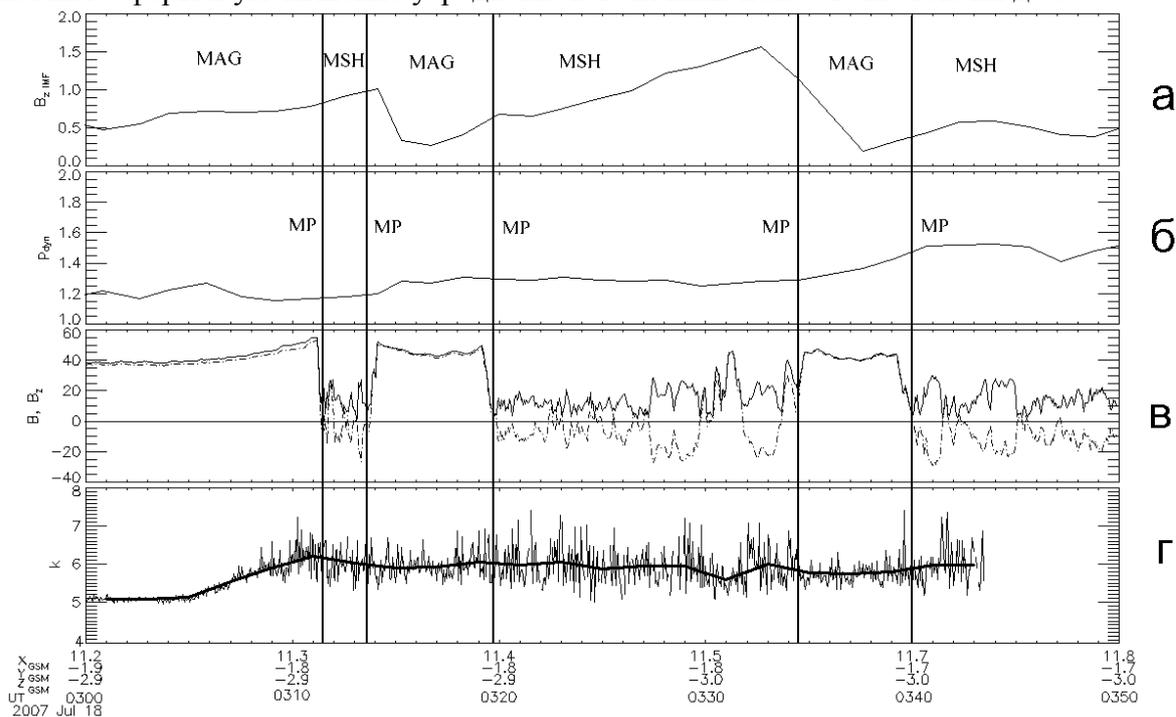


Рис. Временной ход изменения плазменных параметров для события 18 июля 2007 г: а) и б) B_z IMF -компонента межпланетного магнитного поля, нТл и p_{dyn} – динамическое давление солнечного ветра, нПа по данным спутника WIND; в) – модуль B (сплошная линия) и B_z -компонента (пунктир) локального магнитного поля в нТл по данным спутника THEMIS-D; г) k – показатель степени при аппроксимации спектра высокоэнергичных ионов (высокое разрешение $3s$ – тонкая кривая и усреднение за 2 мин – жирная) степенной функцией (по результатам Кирпичев и Антонова [2015]).

24. Изучение распределения параметров электронной популяции в хвосте магнитосферы Земли и их связи с конфигурацией магнитных полей в токовом слое.

Рассмотрена статистика наблюдений спутниковой миссией Кластер интенсивных токовых слоёв (плотности тока > 5 нА/м²), для которых стоит ожидать существенного вклада анизотропии электронов в генерацию тока. Показано, что сильная анизотропия температуры электронов соответствует усиленной амплитуде компоненты B_y (вдоль тока) магнитного поля. Интенсивные токовые слои часто характеризуются значительным (более 30%) вкладом электронных токов кривизны в суммарный ток поперек магнитосферного хвоста. Сравнение спутниковых наблюдений и моделей показывает, что уровень анизотропии электронов контролируется конкуренцией двух процессов: рассеяние электронов на колебаниях магнитного поля, генерируемых шланговой неустойчивостью, и ускорение электронов в деформированных конфигурациях магнитного поля в токовых слоях с сильным магнитным полем B_y .

25. 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.

Исследована двумерная конфигурация токового слоя хвоста земной магнитосферы на основе данных спутниковой миссии THEMIS. Показано, что токовые слои в хвосте земной магнитосферы можно рассматривать как квазиодномерные: толщина слоя не меняется на масштабах в 10-20 радиусов Земли. При этом, плотность тока и амплитуда магнитного поля растут к Земле примерно одинаковым образом. Данные спутниковых измерений сопоставлены с лабораторным моделированием.

26. Исследование распределений магнитного поля и параметров плазмы в дальней области магнитосферного хвоста Земли (на расстоянии 100 радиусов Земли) по данным спутниковой миссии Geotail.

Исследована структура токового слоя магнитосферного хвоста Земли в средней (на расстоянии 20-50 RE) и дальней (на расстоянии 80-100 RE) области по данным аппарата Geotail. Получены распределения параметров токового слоя и установлена их вариация с утреннего фланга на вечерний. Показано, что в дальнем хвосте наблюдаются интенсивные тонкие и менее интенсивные толстые токовые слои. Показано, что наблюдение тонких токовых слоев сопряжено с наблюдением быстрых потоков, а интенсивность тока в токовом слое пропорциональна скорости потока. Разрыв наблюдаемых тонких токовых слоев может приводить к генерации быстрых потоков в магнитосферном хвосте.

27. Флаппинг токовых слоев в ближней области магнитного хвоста Земли: особенности распространения и структура параллельных токов

Исследованы серии пересечений наклонных токовых слоев, соответствующие флаппинговым волновым возмущениям в ближней области земной магнитосферы. Проанализированы данные спутниковой миссии CLUSTER с 2005 по 2009 год, когда аппараты пересекали нейтральную плоскость в областях $X=[-16,-8]$, $Y=[-16,-2]$ Re . В отличие от строгого распространения на фланг, наблюдаемого вблизи центральной области магнитного хвоста, в ближней области зафиксировано азимутальное направление с доминирующей X -компонентой скорости при больших Y . Серии наклонных токовых слоев формируют периодическую систему квазипараллельных токов с характерным поперечным масштабом $L=0.3 Re$. В области образующейся системы возмущений наблюдается уменьшение продольного градиента магнитного поля dBz/dx по сравнению с градиентами в спокойной области ближнего магнитного хвоста. Зафиксирована корреляция между скоростями распространения токовых слоев и амплитудой возмущений магнитного поля. Показано, что средняя длина волны флаппинговых волн (расстояние между соседними пересечениями с одинаковой ориентацией) больше, чем $2\pi L$ для большинства случаев. Проанализированные спутниковые данные подтверждают, что в ближней области магнитного хвоста флаппинг токовых слоев можно представить как серию нелинейных солитоноподобных структур, генерирующих сильные параллельные токи.

28. Исследование структуры и динамики токового слоя в ближних областях геомагнитного хвоста

Статистически подтвержден механизм формирования асимметричных пространственных распределений плотности тока в токовом слое (ТС) геомагнитного хвоста при наличии шировой компоненты магнитного поля.

На основе статистического анализа 17 интервалов пересечений ТС хвоста магнитосферы Земли спутниковым квартетом Cluster установлен механизм формирования асимметричных пространственных распределений плотности тока (см. Рис.) за счет асимметрии север-юг в отражении/преломлении траекторий неадиабатических ионов при их взаимодействии с ТС при наличии в нем шировой компоненты магнитного поля. Данный механизм подтвержден также кинетическим анализом траекторий тестовых ионов в магнитных конфигурациях ТС аналогичных наблюдаемым.

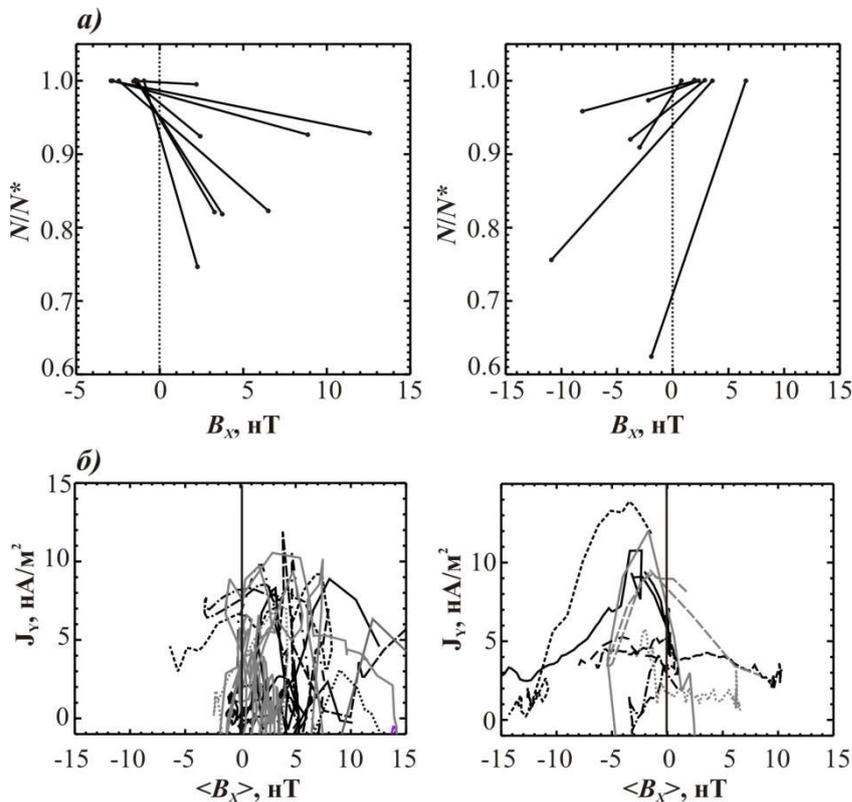


Рис. Пространственные распределения нормированной плотности ионов $N^*(B_X)$ (вверху) и Y -компоненты плотности электрического тока $J_Y(B_X)$ (внизу), наблюдаемые в интервалы пересечений ТС с магнитными конфигурациями: $B_Z > 0, B_Y < 0$ или $B_Z < 0, B_Y > 0$ (левая колонка) и $B_Z > 0, B_Y > 0$ или $B_Z < 0, B_Y < 0$ (правая колонка). Ординаты каждой пары точек, соединенных линией, показывают значения N/N^* , усредненные для данного пересечения ТС по северной (область $B_X > 0$) и южной (область $B_X < 0$) части плазменного слоя. Соединительные линии показывают асимметрию "север-юг" в распределении плотности ионов. Пространственные профили плотности тока $J_Y(B_X)$ для каждого пересечения ТС показаны различными линиями.

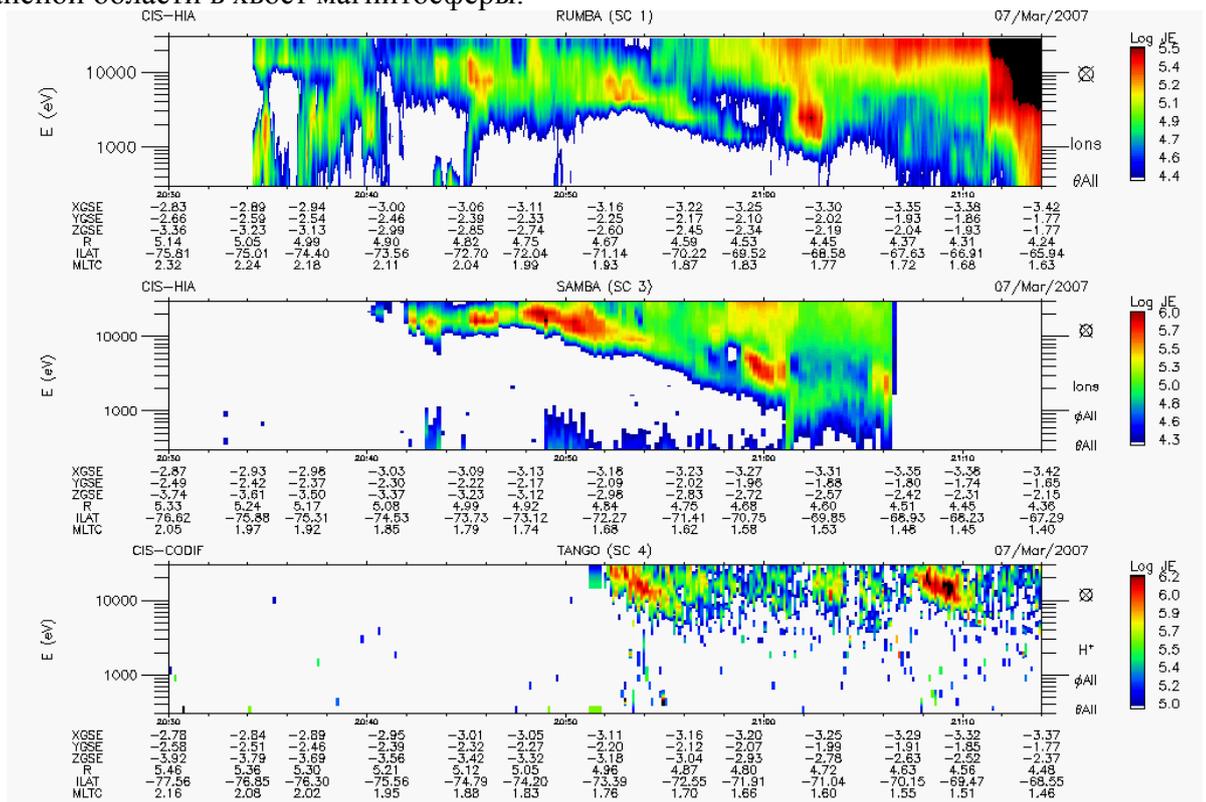
29. Изучение эффективности ускорения электронов и ионов разных масс при разрушении токового слоя (ТС) и формировании X-линии в ближних областях геомагнитного хвоста

На основе анализа семилетних наблюдений потоков энергичных (>150 кэВ) ионов разных масс (H^+, He^+, O^+) получены их пространственные распределения для области ближнего хвоста, наблюдаемые при различных уровнях геомагнитной активности. Показано, что в распределении потоков энергичных ионов наблюдается асимметрия утро-вечер, которая усиливается во время возмущенных геомагнитных периодов. Причиной такой асимметрии могут быть локализация нестационарных (т.е. связанных с генерацией сильных индукционных электрических полей) источников ускорения ионов в вечернем секторе хвоста, а также усиление дрейфа энергичных ионов в сторону вечернего фланга, связанное с наличием сильных градиентов магнитного поля в ближнем хвосте в результате магнитной диполизации при разрушении/ослаблении тока в ТС.

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

Проведено исследование вариаций потоков ионов и электронов в энергетическом диапазоне 0.1-30 кэВ вблизи полярного края плазменного слоя на геоцентрических расстояниях 4-5 R_E (R_E - радиус Земли) по измерениям космическими аппаратами

CLUSTER. Анализ ионных структур на последовательных сечениях указанной зоны тремя спутниками SC-1, SC-3, SC-4 позволил отождествить процессы рождения и распада дисперсионных ионных структур. Используя задержки по времени прохождения выделенных областей этими спутниками, удалось найти время существования ионных структур энергия - инвариантная широта (VDIS - Velocity Dispersed Ion Structure). Время жизни структур как сигнатур ускоренных пучков в пограничном плазменном слое составляет 10-25 мин, что может свидетельствовать о квазистационарном режиме ускорения ионных пучков в дальнем хвосте. Таким образом, экспериментальные результаты указывают, что ускоренные ионные популяции имеют, по-видимому, пространственную природу, образуя несколько бимлетов в выделенных резонансных областях плазменного слоя. Энергия бимлета увеличивается по мере удаления резонансной области в хвост магнитосферы.



На рис. представлены измерения ионов на спутниках CLUSTER (SC-1, SC-3, SC-4 - панели сверху вниз). Спутники последовательно пересекали приполярную авроральную область при движении от полюса к экватору. Только по SC-3 наблюдается чёткая энергодисперсионная структура VDIS в 20:41 - 20:56 UT, в то время как по SC-1 и SC-4 структура отсутствовала. Время существования VDIS по прохождению полярной границы составляет 16 мин по оценке сверху.

31. Оценка величины разрезного кольцевого тока (CRC) при различных условиях в солнечном ветре (спокойный период)

Проведен оценочный анализ гипотезы существования глобальной токовой системы в виде разрезного кольцевого тока. На основании модельных профилей плазменных давлений <http://stdad.iki.rssi.ru/pressuremodel/pressure.php> и реально измеренных средних значениях локального магнитного поля оценена интегральная величина разрезного кольцевого тока. Получено, что замкнутое кольцо существует для широкого диапазона внешних условий в солнечном ветре. Среднее интегральное значение CRC $\sim 0.25 \pm 0.09$ MA (при спокойных условиях) и в пределах ошибок не зависит от условий в солнечном ветре (для значений $0.7 < P_d < 1.9$ нПа, $-3 < B_z < 3$ нТл). Угол наклона CRC увеличивается при увеличении динамического давления и изменяется в пределах от 15 до 18°.

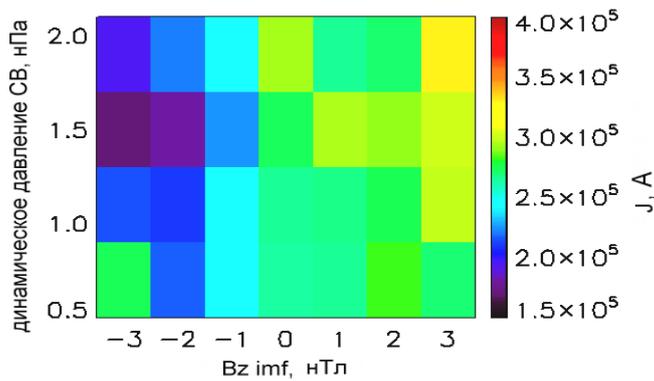


Рис. Интегральная величина разрезного кольцевого тока

32. Анализ распределения магнитного поля и давления плазмы в экваториальной плоскости с использованием данных спутника AMPTE/CCE

Проведен анализ результатов наблюдений ям магнитного поля в эксперименте AMPTE/CCE. Ранее локальные уменьшения магнитного поля регистрировались только в ночном секторе [Saito et al., 2010, doi: 10.1029/2010GL042813; Petrukovich et al., 2013, doi: 10.1002/jgra.50550]. Исследованы вариации магнитного поля вдоль траекторий спутника AMPTE/CCE на геоцентрических расстояниях $<8.8R_E$. Выделено 103 события наблюдений первоначального уменьшения и последующего возрастания B_z компоненты магнитного поля в экваториальной плоскости на различных магнитных локальных временах (MLT). На Рис. слева показан пример наблюдений ямы магнитного поля в утреннем секторе. На Рис. справа отрезками кривых показаны локализации обнаруженных ям магнитного поля в экваториальной плоскости. Из Рис. следует, что ямы магнитного поля наблюдаются на всех магнитных локальных временах. Получены первые результаты анализа причин возникновения локальных минимумов магнитного поля. Отмечено, что данный результат хорошо стыкуется с полученными ранее результатами о существовании высокоширотного продолжения кольцевого тока до магнитопаузы в дневные часы и до геоцентрических расстояний $\sim 10-12R_E$ в ночные, так как внутри кольцевого тока происходит уменьшение магнитного поля.

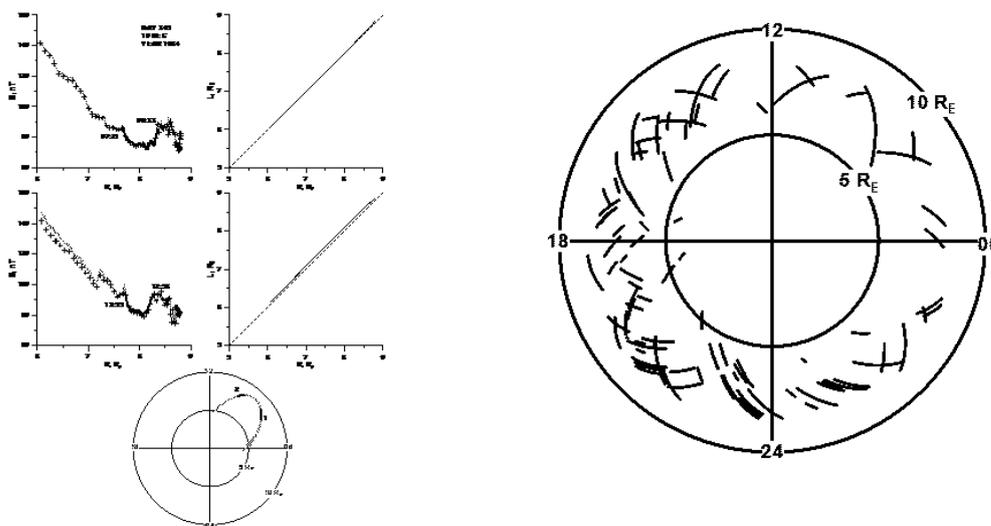


Рис. слева - пример наблюдений ямы магнитного поля в утреннем секторе (событие 10 декабря 1984 г.), справа - положение выделенных 103 минимумов магнитного поля

33. Физическая реконструкция трехмерного распределения плотности протонов во всей плазмосфере в спокойных условиях по измерениям вдоль одной орбиты спутника.

Разработана первая основанная на физических принципах полуэмпирическая трехмерная модель плотности протонов, позволяющая восстановить распределение плазмы во всей плазмосфере Земли для спокойных геомагнитных условий по измерениям заряженных частиц вдоль одной орбиты спутника. Модель основана на экспериментальных данных прибора АЛЬФА-3, работавшего на космическом аппарате *ИНТЕРБОЛ-1*, и теоретических выражениях, описывающих распределение плазмы в плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального частичного заполнения плазмосферных оболочек. Теоретическая двумерная модель затем расширяется до трехмерной с помощью уравнений для линий конвекции плазмы в экваториальной плоскости и плазмопаузы – последней замкнутой линии конвекции. В левой части рис.1 в проекции на экваториальную плоскость показана одна из орбит ИНТЕРБОЛА-1, а в центре и справа – измеренная концентрация протонов (точки) в зависимости от параметра L и геомагнитной широты, соответственно.

Модель имеет 6 свободных параметров, имеющих ясный физический смысл: 3 параметра описывают положение и форму плазмопаузы, 2 параметра описывают распределение плазмы в экваториальной плоскости вдоль одного выделенного направления и 1 параметр относится к степени заполненности плазмосферы. Оптимизацией этих параметров в 6-мерном конфигурационном пространстве обеспечивается наилучшее согласие модели (сплошная линия на центральной и правой панелях рис.1) с результатами измерений.

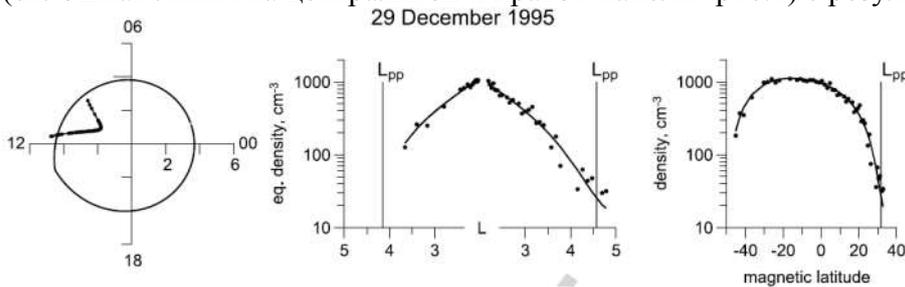


Рис.1.

На рис.2 показаны распределение концентрации протонов во всей экваториальной плоскости, линии конвекции плазмы (точки) и положение плазмопаузы (толстая кривая) восстановленные по результатам измерений, представленных на рис. 1.

Разработанный в рамках этой модели физический подход к восстановлению распределения плазмы во всей плазмосфере по данным одного пролета спутника через эту область обеспечивает надежное сопоставление результатов плазменных измерений на космических аппаратах, находящихся в различных частях плазмосферы.

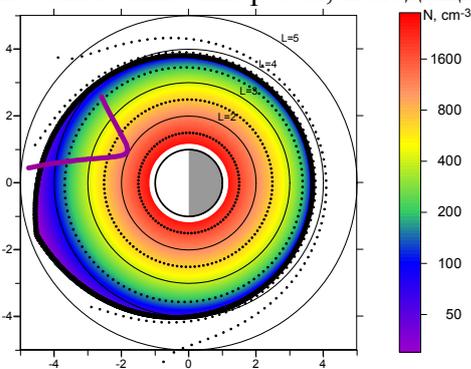


Рис.2.

34. Проецирование аврорального овала на экваториальную плоскость

Показано, что основная часть аврорального овала в относительно возмущенных геомагнитных условиях (до $AL=-600$ нТл) не проецируется на плазменный слой хвоста магнитосферы Земли. Проецирование выделяемых на ионосферных высотах плазменных доменов на экваториальную плоскость без использования модели магнитного поля [Антонова и др., 2015, Геомагнетизм и аэрономия, doi:10.7868/S001679401403002X] показало, что значения давления на высотах спутника DMSP (на высоте ~ 800 км) значительно превысили измеренные значения давления в плазменном слое. Сравнение с давлением в экваториальной плоскости по модели Кирпичева и Антоновой (<http://stdad.iki.rssi.ru/pressuremodel/pressure.php>) показало, что основная часть аврорального овала как в магнитоспокойных условиях (что было показано ранее), так и в магнитовозмущенных условиях проецируется не на собственно плазменный слой, а на окружающее Землю плазменное кольцо на геоцентрических расстояниях до магнитопаузы в дневные часы и до $\sim 10-12R_E$ в ночные. Данный результат снимает проблему проецирования плазменного слоя на ионосферные высоты, так как такое проецирование не могло объяснить наблюдений широтной протяженности аврорального овала в подсолнечной точке. Высказано предположение о проецировании собственно плазменного слоя на область мягких диффузных высыпаний (SDP по классификации модели <http://apm.pgia.ru/>) к полюсу от аврорального овала.

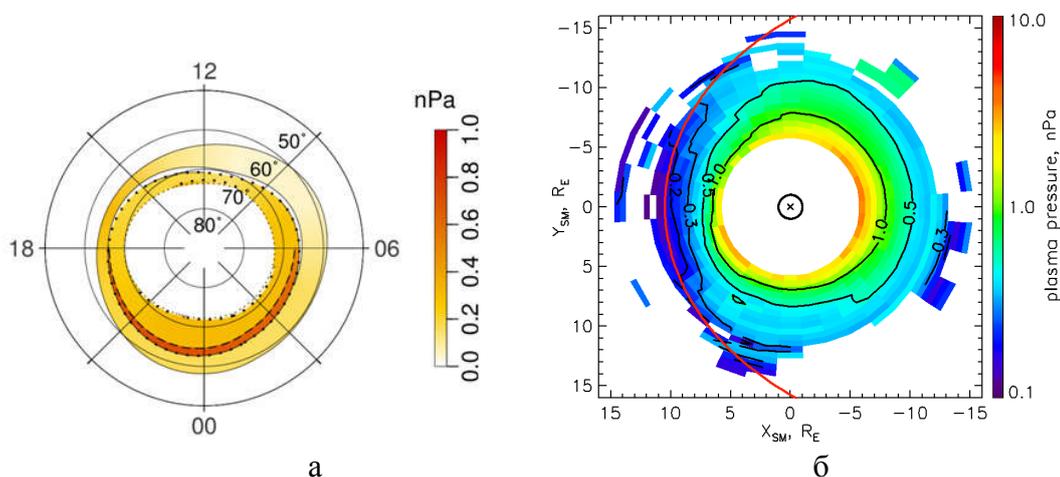


Рис. Сравнение распределения давления плазмы на малых высотах (а) и в экваториальной плоскости в окружающем Землю плазменном кольце (б) при $AL=-600$ нТл и $Dst=-20$ нТл. Точками выделено положение аврорального овала [Antonova et al., 2015].

35. Доказательство физической взаимосвязи развития поляризационного джета в ионосфере с инжекцией энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу.

По данным спутников DMSP впервые статистически исследована зависимость положения экваториальной границы поляризационного джета от величины AE – индекса. По данным измерений на спутнике AMPTE/CCE для изолированных магнитных возмущений проанализировано положение внутренней границы инжекции энергичных ионов ($\sim < 50$ кэВ) также от величины AE. Оказалось, что зависимости обеих границ от AE – индекса совпадают в широком диапазоне изменений AE (Рис. 1.). Это свидетельствует о том, что экваториальная граница полосы поляризационного джета и внутренняя граница инжекции энергичных ионов физически взаимосвязаны и во время суббурь формируются на одних и тех же L-оболочках. Ранее о возможном совпадении этих границ говорилось только на основании сопоставления отдельных пролетов спутников. Таким образом, развитие поляризационного джета в ионосфере связано с инжекцией энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу, и механизм, который описывает возникновение и развитие поляризационного джета, должен непременно учитывать инжекции энергичных частиц.

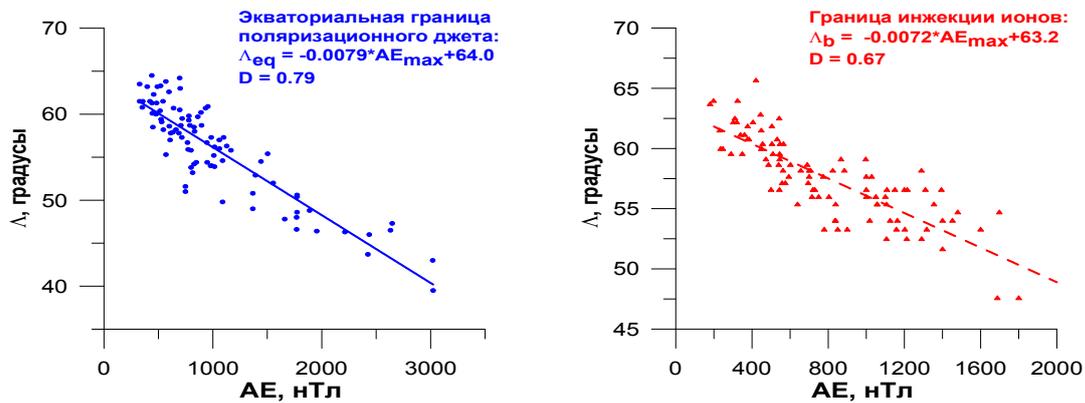


Рис. Зависимость экваториальной границы поляризационного (слева) и границы инъекции энергичных ионов во внутреннюю магнитосферу (справа) от начального всплеска АЕ суббуревой активности. Сплошная синяя и пунктирная красная линии – соответствующие аппроксимирующие зависимости.

36. Ионосферные проявления крупномасштабной конвекции плазмы в магнитосфере.

Проанализированы данные (суточные f-графики) Якутской меридиональной цепочки ионозондов (Якутск - Жиганск - Батагай - Тикси) с резкими падениями (срывами) критической частоты (foF2) регулярного F2-слоя ионосферы. С помощью расчетов, выполненных по прогностической модели высокоширотной ионосферы, показано, что положение срывов критической частоты совпадает с экваториальной границей крупномасштабной конвекции плазмы в вечернем секторе местного магнитного времени. Проанализированы данные за 1968 - 1983 гг. и приведена статистика наблюдений срывов foF2, показывающая, что они регистрируются, в основном, в равноденственные месяцы и в послеполуночные и вечерние часы при умеренно-возмущенных геомагнитных условиях.

37. Фоновая тепловая плазма во внутренней магнитосфере (по результатам зонда Ленгмюра на КА Интербол-2)

Проведен критический обзор экспериментальных сведений о тепловой ($E \leq 10$ эВ) плазме во внутренней магнитосфере (ВМ) в авроральной зоне и полярной шапке. Практически все данные по N_e тепловой плазмы в полярной магнитосфере были получены методом плавающего потенциала (FPM) или различными волновыми методами. По своей природе метод FPM показывает положительный потенциал КА (ПК) всегда – даже если КА имеет отрицательный ПК. Поэтому практически все (за редким исключением) имеющиеся в литературе данные по N_e холодной плазмы являются просто неверными. Эксперимент Интербол-2/КМ-7 показал в авроральной зоне преимущественно отрицательный потенциал, что противоречит результатам всех предыдущих экспериментов, использующих метод FPM или большинства волновых методов

По измерениям параметров тепловой плазмы при помощи зонда-Ленгмюра на КА «Интербол-2» обнаружено, что :

- Во внутренней магнитосфере в целом (при усреднении по MLT, широтам и солнечной геомагнитной активности) в высотном ходе N_e обнаружен широкий максимум, простирающийся от 14000 до 18500 км.

- Этот максимум N_e сопровождается “противофазным” минимумом в высотном ходе электронной температуры T_e .

- Тепловая плазма в авроральной зоне практически всегда не является максвелловской и состоит из нескольких компонент (горячих “хвостов” и электронных пучков - движущейся плазмы) с энергией > 3 эВ

38. Потенциал спутника ИНТЕРБОЛ-2 и фотоэмиссия с его поверхности в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2-3 R_E при низкой солнечной активности

Сопоставление одновременных измерений потенциала спутника Интербол-2 зондовыми приборами ИЭСП-2 (измеритель электрических полей) и КМ-7 (датчик электронной температуры) позволяет оценить величину плотности фотоэлектронного тока, а также корректность выбора тока смещения прибора ИЭСП-2. Показано, что потенциал спутника «Интербол-2» в авроральной зоне магнитосферы на высотах 2 - 3 R_E в основном положителен (Рис. 1а) и в ~75% случаев находится в интервале $\Phi_{ка} = +2 \div +5$ В. Разность потенциалов между разнесенными в поперечном направлении Y зондами Eу1 и Eу2 прибора ИЭСП-2 значительно меньше и составляет $\sim 0,2 \div 0,4$ В (Рис.1б.). Если из всех измерений, представленных на Рис. 1б, выделить измерения при $\Phi_{ка} > +5$ В (Рис. 1в) и $\Phi_{ка} > +7$ В (Рис. 1г), то можно сделать вывод об увеличении $abs(Eу1 - Eу2)$ с $\sim 0,5$ В до ~ 1 В и соответствующем увеличении поперечного электрического поля в Y-направлении с увеличением потенциала спутника. Одновременно повышенные значения $\Phi_{ка}$ регистрировались и прибором КМ-7.

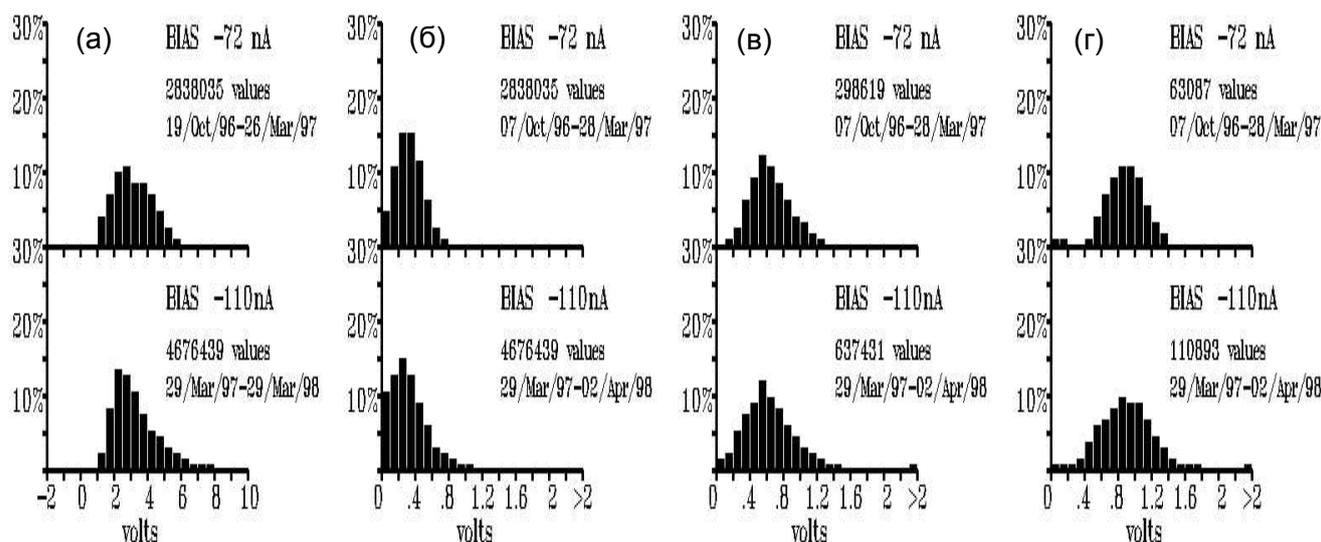


Рис. Гистограмма результатов измерения потенциала $\Phi_{ка}$ спутника «Интербол-2» (а) прибором ИЭСП-2 (полусумма разности потенциалов между спутником и сферическими зондами Eу1 и Eу2) при токе смещения -72 nA и -110 nA и гистограмма значений разности потенциалов этих зондов $abs(Eу1 - Eу2)$ для ~ 4 миллионов измерений на ~350 участках орбит в авроральной зоне магнитосферы (б). На рис. 1 в,г показаны гистограммы $abs(Eу1 - Eу2)$ при $\Phi_{ка} > 5$ В и $\Phi_{ка} > 7$ В, соответственно.

39. Проецирование положение границ аврорального овала на пространственное распределение Pc5 волновой активности.

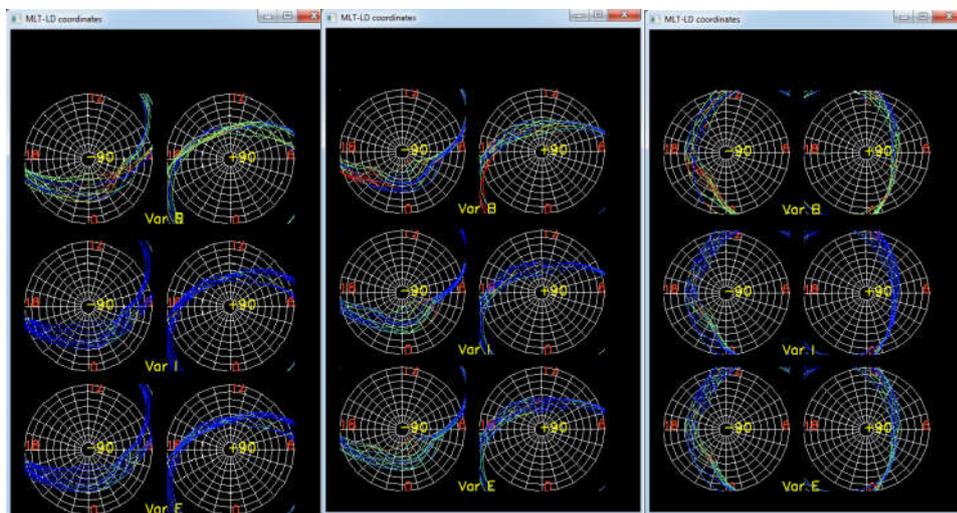
Показано, что эпицентр спектральной мощности широкополосных колебаний в диапазоне Pc5 в начальную фазу бури отображается внутри аврорального овала. Во время восстановительной фазы, спектральная мощность узкополосных Pc5 волн, как в утреннем и вечернем секторах, отображается внутри аврорального овала или вблизи его

экваториальной границы. Этот результат наблюдений подтверждает ранее обнаруженные эффекты: пространственные / временные вариации мощности Pc5 волн в утреннем / дополуночном секторе тесно связаны с расположением и аврорального электроджета и магнитосферных продольных токов. В то же время, узкополосные Pc5 волны демонстрируют типичные резонансные особенности в амплитудно-фазовой широтном распределении. Таким образом, положение аврорального овала (или его экваториальной границы) является предпочтительной широтой для возбуждения магнитосферного резонатора силовых линий. Этот эффект не учитывается современными теориями волн Pc5, но это может быть значимым для развития более адекватной модели.

40. Разработка методов определения электромагнитных параметров среднеширотной и приэкваториальной ионосферы в спокойных и возмущённых геомагнитных условиях. Проведение статистического анализа интенсивностей электромагнитных излучений в диапазоне 2-400 Гц по индексам геомагнитной активности.

Разработка методов определения электромагнитных параметров среднеширотной и приэкваториальной ионосферы осуществлена с использованием, созданной по данным космического эксперимента «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС, базы мониторинговых данных об интегральной мощности флуктуаций магнитного поля B , электрического поля E и плотности тока J в диапазоне 2-400 Гц с временным разрешением 1 сек. Пространственно-временной анализ мониторинговых данных проведен в целях изучения существования связи количества и мощности аномалий с временем суток, временем года, магнитным локальным временем и дипольной магнитной широтой.

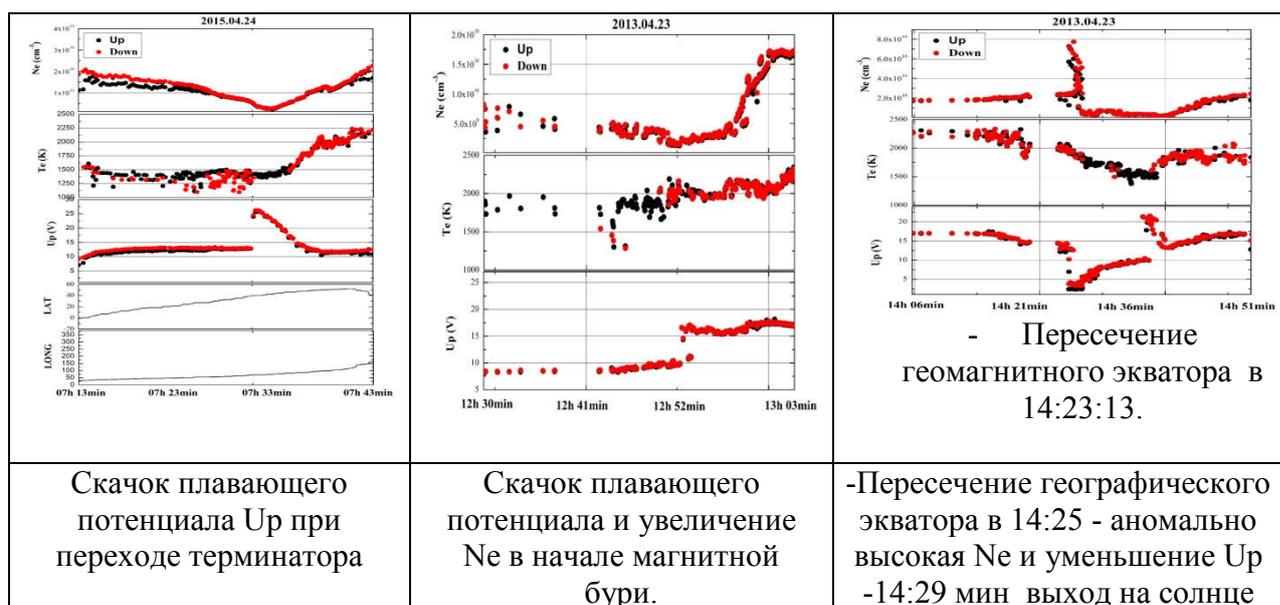
На основе этих данных проведены в течение ~3-х лет исследования сезонных вариаций B , E и J . Важно отметить наличие в этих данных флуктуаций плотности тока J , измеренных по методу щелевого зонда Ленгмюра.



Интегральная мощность флуктуаций (вариаций Var) B , E и J в диапазоне 2-400 Гц для 4 мая 2013г (слева), 2 мая 2014г (в центре) и 16 января 2015г (справа).

Важными параметрами для определения электромагнитных параметров среднеширотной и приэкваториальной ионосферы в спокойных и возмущённых геомагнитных условиях являются электронная температура и концентрация электронов N_e и ионов N_i в окрестности станции, измеряемые прибором Зонд Ленгмюра. Тем же прибором измеряется и потенциал корпуса относительно плазмы. Прибор расположен на около 1,5 м от поверхности модуля «Звезда» РС МКС. Измерения показали, что в зоне затенения другими модулями концентрация плазмы на 2 порядка меньше, чем в невозмущенной

зон. Потенциал корпуса колеблется между 3 и 20 вольт, но всегда отрицателен относительно плазмы в различных геофизических и орбитальных условиях.



41. Роль неоднородностей плазмы на возбуждение ионно-циклотронных волн в авральной области.

Рассмотрены условия развития плазменной неустойчивости в различных условиях. Показано, что детальный вид распределения неоднородностей электрического поля или плотности плазмы слабо влияет на возбуждение неустойчивостей. Более важным фактором является характерный масштаб неоднородности в генерации электростатических ионно-циклотронных волн. Анализ развития IEDD (inhomogeneous energy-density-driven) неустойчивости, к которой приводит неоднородное распределение плотности энергии, связанное со сдвигом скорости в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю, показывает, что пренебрежение слабыми вариациями и усреднение электрического поля и плотности плазмы вполне оправданно и может дать физически достоверный результат. Также подтверждено, что неоднородности плазмы могут служить источником неустойчивости даже в отсутствие неоднородностей электрического поля, хотя и более слабым по сравнению с неоднородностями электрического поля. Это объясняется тем, что неоднородности плотности имеют больший порядок малости в нелокальном дисперсионном уравнении. Если неоднородности электрического поля и концентрации плазмы присутствуют одновременно, то происходит уширение области неустойчивости. Данная неустойчивость может приводить к нагреву ионов в ионосфере Земли и их последующему "убеганию" в магнитосферу вследствие пробочной конфигурации магнитного поля, где имеются сильные сдвиги скорости и неоднородности концентрации плазмы.

42. Изучение интенсивности эмиссии энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода на дневной стороне Марса в присутствии магнитных аномалий.

Проанализированы данные по эмиссии ЭНА водорода на дневной стороне Марса во время спокойных условий и низком динамическом давлении солнечного ветра. Эти данные были получены детектором нейтральных частиц (НПД) плазменного комплекса АСПЕРА-3 на борту космического аппарата «Марс-Экспресс» в период с 14 марта по 9 июля 2004 г.

Было выявлено несколько случаев усиления эмиссии ЭНА водорода в то время как магнитные аномалии находились на обращенной к Солнцу стороне Марса вблизи поля зрения НПД. Была построена карта распределения интенсивности эмиссии ЭНА водорода

(в планетарной системе координат), выраженной в дифференциальных потоках ЭНА водорода, нормализованных к положению источника ЭНА водорода вблизи границы индуцированной магнитосферы Марса. В интервалах от 20° до 60° и от 140° до 280° восточной долготы в пределах между 30° южной широты и 30° северной широты были найдены два максимума в потоках ЭНА водорода с размахом от 1.4 до 1.9. Эти два увеличения интенсивности эмиссии ЭНА водорода коррелируют с присутствием двух самых мощных магнитных аномалий Марса.

Предложены два возможных механизма, объясняющих эти корреляции. Для первого механизма характерно отклонение направленного потока плазмы в области магнитной аномалии в сторону детекторов НПД, ведущее к увеличению количества зарегистрированных ЭНА. Второй механизм показывает увеличение плотности экзосферы вблизи магнитных аномалий, что также ведет к увеличению количества зарядо-обменных столкновений, ведущих к усилению эмиссии ЭНА водорода.

43. Поперечный нагрев ионов на движущейся полярной границе аврорального овала

На основе комплексных измерений параметров плазмы и электромагнитных полей на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (Авроральный зонд) проекта ИНТЕРБОЛ исследован механизм нагрева ионов при геомагнитных возмущениях. Были отобраны случаи пересечения границы спутником, когда имелись одновременные изображения свечения полярной ионосферы прибором UVI, который стоял на спутнике POLAR. Используя последовательность изображений аврорального овала, были получены скорости смещения полярной границы относительно спутника Интербол-2. По данным приборов Гиперболоид и Ион (Интербол-2) были получены скорости поперечного нагрева ионов H^+ и O^+ на полярной границе. Из анализа данных делается вывод, что чем больше скорость смещения полярной границы, тем сильнее происходит поперечный нагрев ионов, достигая сотен эВ/с в некоторых случаях. Авторы предполагают, что нагрев происходит не за счет циклотронного резонанса с электростатической турбулентностью, которая присутствует в этой области, а за счет изменения тока на полярной границе.

44. Воздействие ионосферной плазмы на формирование барстерной структуры АКР

Общепризнанным механизмом генерации аврорального километрового радиоизлучения является циклотронная мазерная неустойчивость на локальной гирочастоте электронов, развивающаяся в областях с пониженной плотностью плазмы – каверне Кальверта, в которой плазменная частота f_{pe} ниже гирочастоты электронов f_{ce} . Динамические спектры АКР весьма разнообразны и изменчивы, как по частоте, так и по времени. Обычно АКР наблюдается в частотном диапазоне 100-700 кГц, и ширина его спектра медленно изменяется в течение несколько десятков минут. В данной работе на основе измерений электромагнитного излучения в диапазоне частот 4 кГц – 1 МГц, сделанных на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 при помощи прибора ПОЛЬРАД, исследуются широкополосные квазипериодические всплески АКР, которые по аналогии с астрофизическими всплесками были названы «барстерами». Характерными особенностями этих всплесков является различие времени нарастания и спада - время нарастания много меньше, чем время спада. Период повторений данных всплесков составляет порядка 6-10 минут. Стоит отметить, что барстеры наблюдаются в начале или конце цуга колебаний. Показано, что при установлении режима генерации развитие циклотронной неустойчивости очень чувствительно к внешним условиям, а именно изменению концентрации фоновой плазмы.

45. Моделирование возбуждаемых грозовой и техногенной активностью низкочастотных электромагнитных излучений, обнаруженных спутниками Чибис-М и CNOF/S в верхней ионосфере

Анализ данных электрического датчика на борту низкоорбитальных спутников Чибис-М и CNOF/S доказал наличие в верхней ионосфере в ночные часы низкочастотных электромагнитных излучений с полосовой спектральной структурой, возбуждаемых грозовой активностью: ионосферного альвеновского резонатора (частоты от ~ 0.5 Гц до ~ 5 Гц) и шумановского резонанса (частоты ~ 8 Гц и гармоники). Хотя наземные проявления этих структур хорошо известны, возможность их просачивания в верхнюю ионосферу оставалась весьма гипотетичной. Построена численная модель импульсного возбуждения ионосферного альвеновского резонатора грозовым разрядом. Моделирование распространения и многократного частичного отражения альвеновского импульса в ионосфере согласуются с особенностями низкочастотных возмущений, зарегистрированных на Чибис-М в окрестности низкоширотных грозовых центров. Также показана возможность регистрации в верхней ионосфере излучения с частотами 50/60 Гц от наземных линий электропередач. Проведенный анализ синхронных спутниковых и наземных данных может ответить на вопрос о том, насколько велико воздействие атмосферных процессов и промышленной деятельности на околоземное пространство.

46. Модуляция сигналов спутниковой навигационной системы GPS МГД волнами

Сигналы глобальных спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС можно использовать для изучения пространственно-временной картины воздействия магнитосферных возмущений на полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы. Впервые обнаружены эффекты модуляции ПЭС УНЧ магнитосферными волнами (диапазон Pc5) как на высоких, так и на низких широтах. Разработана теоретическая модель взаимодействия различных типов МГД волн - альвеновской и быстрой магнитозвуковой, с системой ионосфера - атмосфера - земля. Опираясь на эту модель, количественно проинтерпретированы эффекты одновременных периодических вариаций геомагнитного поля и ПЭС ионосферы.

47. Обнаружение в спектрограммах спутника DEMETER ранее предсказанного на основе численного моделирования спектрограмм нового волнового явления в КНЧ диапазоне – ионосферно-отраженных протонных свистов.

Предсказано, обнаружено экспериментально и объяснено новое волновое явление в КНЧ диапазоне – ионосферно-отраженные протонные свисты, наблюдаемое на низких широтах в верхней ионосфере. Показано, что формирование этого волнового явления связано с отражением волн на межиионном гибридном резонансе, которое возникает в неоднородной плазме, содержащей несколько сортов ионов. Выполнено численное моделирование спектрограмм протонных свистов, которое воспроизводит основные особенности наблюдаемого явления. Разработанная для этого программа, основанная на уравнениях геометрической оптики, позволяет детально исследовать различные типы протонных свистов на основе численных экспериментов. Сопутствующим результатом выполненного исследования, основанным на анализе спектрограмм протонных свистов, является установление размера области в волноводе земля-ионосфера, из которой излучение молниевых разрядов проникает в магнитосферу. Этот размер может превышать 4000 км. вдоль меридиана. Данный результат важен для понимания природы таких волновых явлений как магнитосферно-отраженные свисты, протонные свисты, а также для исследований распространения и взаимодействия с частицами электронных свистов в магнитосфере.

48. Наблюдение по данным спутника DEMETER возмущений в КНЧ/ОНЧ частотных диапазонах, обусловленных воздействием на ионосферу мощного КВ передатчика HAARP.

КНЧ/ОНЧ сигналы были зарегистрированы на электрических антеннах в дневные часы (LT=11-12) при максимальной мощности передатчика HAARP (3.6 МВт), излучавшего на частотах 4.5-5 МГц близких к критической частоте (f_oF_2) ионосферного слоя F, время нагрева до пролета ИСЗ составляло 10-15 минут. На высоте спутника DEMETER около 700 км пространственный размер области возмущений в КНЧ/ОНЧ сигналах, вызванных работой нагревного стенда, имеет размеры ~ 102 км. Проанализированы амплитуда, спектр и поляризация КНЧ возмущений, проведено их сравнение с характеристиками естественных КНЧ шумов над передатчиком HAARP. В частности, показано, что в дневные часы амплитуда КНЧ возмущений над зоной нагрева может в 3÷8 раз превышать амплитуду естественных КНЧ шумов. В спектрах ОНЧ сигналов, связанных с работой передатчика HAARP, регистрировались два максимума: на частотах 8÷10 кГц и 15÷18 кГц, которые близки к первой и второй гармоникам частоты нижнего гибридного резонанса в области нагрева. Для этих сигналов продемонстрировано влияние эффектов распространения свистовых волн вблизи области нижнего гибридного резонанса на спектр возмущений, регистрируемых в верхней ионосфере. В частности, ряд особенностей спектра удаётся объяснить в предположении, что ОНЧ сигналы распространяются в квазирезонансном режиме.

49. Анализ свойств квазипериодических ОНЧ излучений, зарегистрированных одновременно на спутнике RBSP-A и на Земле, локализация их источника.

Квазипериодические (QP) эмиссии в ОНЧ частотном диапазоне 2-6 кГц наблюдались во время суббури 25 января 2013 на спутнике RBSP-A и на наземной станции в Северной Финляндии. Спутник регистрировал ОНЧ сигналы в ночном секторе вблизи экватора на $L=3.0-4.2$ внутри плазмосферы и двигался в область больших широт. При этом временной интервал между QP элементами уменьшался в два раза от 6 мин. до 3 мин. Выявленное взаимно однозначное соответствие между QP элементами на спутнике и на наземной станции показало, что уменьшение периодов следования QP элементов не были связано с изменением положения спутника в пространстве, а носило исключительно временной характер. На спутнике RBSP-A наблюдались синхронные вариации интенсивности QP излучений и функции распределения электронов с энергиями 10–20 кэВ вблизи экватора около L оболочки $L=4$, что свидетельствует, с большой вероятностью, о пересечении спутником области источник QP излучений.

50. Исследование уединенных трансionoсферных УКВ импульсов по данным микроспутника «Чибис-М»

Представлены результаты регистрации УКВ сигналов природного происхождения радиочастотным анализатором (РЧА) с полосой пропускания 26-48 МГц и частотой оцифровки 96 МГц, установленного на борту микроспутника «Чибис-М». Основное внимание в этой уделяется так называемым Транс-ионосферным парам импульсов. Длительность таких импульсов составляет 5-20 мкс, а временная задержка между 1 и 2 вторым сигналом доходит до нескольких десятков микросекунд. Частотная дисперсия сигнала указывает на его суб-ионосферное происхождение. Природа источника такого рода сигналов до конца ещё не установлена.

Первооткрыватели этого природного явления (Holden and Massey [1995], Jacobson et al. [1999]) показали, что наблюдение «пар» широкополосных импульсов можно объяснить тривиальным образом: второй импульс является отражением исходного сигнала («первого» импульса) от поверхности Земли. Однако данные прибора РЧА показали, что существуют «одионочные» УКВ импульсы (второй сигнал отсутствует в течение более 100

мкс), что на первый взгляд кажется противоречивым фактом. Нами было показано, что такого рода «уединенные» импульсы не противоречат предыдущим изысканиям, а являются результатом слияния исходного и отраженного сигналов при определенных параметрах состояния нижней ионосферы и большого угла наблюдения источника излучения. Наше исследование еще раз подтвердило гипотезу об отражении УКВ сигнала от поверхности Земли, что является критическим моментом для продолжения изучения свойств транс-ионосферных УКВ импульсов. Опираясь на этот факт, мы можем достоверно определить высоту и (в некоторых случаях) скорость перемещения излучателя. Для одного из событий, приведенных в статье, нам удалось определить высоты (13,2; 11,6 и 8 км), что эквивалентно скорости перемещения излучателя со скоростью ~ 107 м/с.

51. Взаимодействие УНЧ-КНЧ электромагнитных возмущений с ионосферой: наблюдения на низко-орбитальных микро-спутниках и на земной поверхности

Проведенный цикл исследований был нацелен на изучение взаимодействия УНЧ-КНЧ волн с системой ионосфера – атмосфера – земля в диапазоне природных резонаторов: шумановского резонанса (ШР) и ионосферного альвеновского резонатора (ИАР). Экспериментальная часть основана на анализе синхронных спутниковых и наземных электромагнитных наблюдений с использованием данных мировой сети высокочувствительных магнитометров и низко-орбитальных спутников CHAMP и SWARM. Для интерпретации экспериментальных результатов выполнено численное моделирование прохождения МГД волн разных поляризаций через ионосферу с использованием моделей IRI и MSIS. Разработанные модели, как в приближении тонкого E-слоя, так и реальной ионосферы, могут ответить на следующие вопросы: Каково искажение спектрального состава возмущений при прохождении через ионосферу? Какое влияние на прохождение МГД волн оказывает наличие ИАР и БМЗ волновода в верхней ионосфере? Как условия прохождения / отражения волн зависят от локального времени, сезона, возмущенности? Насколько адекватно наземные наблюдения отражают волновую активность в магнитосфере?

52. Новый вид ОНЧ излучений (1-3 кГц) грибообразной формы

В авроральных широтах обнаружены нетипичные ОНЧ-излучения в виде серии квазипериодических ОНЧ сигналов длительностью несколько минут каждый и имеющие необычную грибообразную форму. Показано, что временная последовательность появления «грибов» четко контролировалась геомагнитными пульсациями Pc5, наблюдаемыми одновременно на земной поверхности и спутнике THEMIS-E. Подобные квазипериодические вариации отношения холловской и педерсеновской проводимости в это время регистрировались и на радаре EISCAT в Тромсё. Высказано предположение, что грибообразная форма ОНЧ-излучений есть результат совместного эффекта особенностей генерации ОНЧ-волн в магнитосфере и их распространения в волноводе Земля-ионосфера.

53. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авроризор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных КА.

Предложен проработанный вариант постановки орбитального эксперимента по дистанционной диагностике характеристик ионосферы с помощью спектральных изображающих приборов в ВУФ-диапазоне спектра. Рассмотрено шесть типов приборов (модулей), включая спектрально-полосовые изображающие камеры и изображающие спектрометры для глобальной крупномасштабной диагностики с высокоапогейного КА и мелкомасштабной локальной диагностики с низкоорбитального КА. Представляются их

предварительные оптические схемы и характеристики. Определены основные прикладные и научные задачи, решаемые на основе данных оптического комплекса, в интересах науки и различных министерств и ведомств.

54. Основы перспективной системы контроля состояния фоновой обстановки в полярной ионосфере и ее краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли.

Рассмотрены проблемные вопросы и представлены пути развития системы контроля фоновой обстановки в полярной ионосфере Земли. Предложен предварительный состав информационных, модельных и экспериментальных блоков, составляющих систему, развиваемую на едином базовом ПО, каждый из которых несет свою специфическую функциональную нагрузку и может быть востребован оператором в любой момент. Обращено внимание на ряд принципиально новых качеств системы: использование алгоритма разбиения околоземного пространства на ячейки с помощью неоднородной, неортогональной, сетки; преимущества орбитальной широкоугольной оптической диагностики фоновой обстановки, использования глобальных и локальных карт ионосферных электродинамических параметров, построенных по данным дистанционных оптических наблюдений, в уточнении модельных расчетов.

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

Проведен анализ возмущений магнитного поля на поверхности Марса, являющихся результатом взаимодействия солнечного ветра с ионосферой Марса и магнитными аномалиями на его поверхности, а также возмущений электромагнитных полей планетарного происхождения. На основе полученных результатов предложен прибор по мониторингу электромагнитных эмиссий на поверхности Марса.

56. Структуры постоянных и переменных магнитных полей около Луны и Ганимед и отражение частиц от реголита.

Одним из интересных явлений, связанных с взаимодействием солнечного ветра с Луной, является формирование «мини» - магнитосфер над областями аномальной намагниченности на поверхности Луны. Собственное магнитное поле аномалий и формирующийся над их областями скачок магнитного поля («квази» - ударная волна) эффективно отражают ионы и электроны плазмы солнечного ветра. В работе рассмотрены возможные механизмы генерации колебаний в плазме вблизи областей мини-магнитосфер, связанные с присутствием в набегающем потоке солнечного ветра популяций отраженных частиц.

В рамках технических предложений по комплексу научной аппаратуры для миссии «Лаплас-П» выпущено техническое предложение по проведению магнитных измерений на посадочном модуле на поверхности Ганимеда, спутника Юпитера, и на борту орбитального аппарата вокруг Ганимеда. Показано, что одновременные измерения магнитных полей на двух аппаратах дают возможность получить новые данные о собственном магнитном поле Ганимеда его взаимодействии с плазмой магнитосферы Юпитера, а также о недрах Ганимеда и, в частности, наличие «соленого» океана. В рамках предложения проведено предварительное рассмотрение необходимых параметров магнитометрической аппаратуры и определены ее общие технические характеристики, необходимые для этапа эскизного проектирования.

57. Исследования авроральных характеристик и высотной структуры эмиссий верхней атмосферы и ионосферы Земли с использованием метода

пространственных реконструкций изображений, полученных с высоты орбиты перспективного микроспутника.

Рассмотрен ряд примеров мелкомасштабных авроральных явлений в полярной ионосфере и предложен низкобюджетный вариант проведения экспериментов по исследованиям характеристик мелкомасштабных авроральных структур, механизмов их генерации и мониторингу характеристик аврорального овала в его локальных неосвещенных областях. Определены предварительные характеристики прибора в видимом диапазоне спектра «Летиция-микро», требования к микроспутнику.

58. 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.

Рассмотрены возможные источники и механизмы генерации эмиссии мягкого (3-8 кэВ) рентгеновского излучения, которое наблюдалось на затенённых участках орбиты спутника «Коронас-Ф» с помощью детектора рентгеновского излучения РПС-1 в 2001-2005 годах в период спада солнечной активности в геомагнитно спокойные периоды. В зависимости от географического положения места наблюдения яркость эмиссии варьируется от 10 Вт до 40 кВт (область Южно-Атлантической магнитной аномалии). Наиболее вероятным механизмом излучения является тормозное излучение заряженных частиц для стационарных высыпаний из радиационных поясов Земли в верхнюю атмосферу.

59. Оценки проникновения магнитных и электрических полей, возбуждаемых высокоширотными продольными токами магнитосферного происхождения, в ионосферу средних широт

С помощью численной модели высокоширотной ионосферы проведена оценка влияния электрических полей магнитосферного происхождения на распределение электронной концентрации (N_e) в F слое. Траектории конвекции плазменных трубок моделируются в блоке расчёта ионосферных электрических полей с непрерывной зависимостью их геометрии и интенсивности от параметров солнечного ветра. В ионосферном блоке с учётом временной эволюции траекторий плазменных трубок рассчитывается высотное распределение N_e . Решается уравнение баланса и конвективно-диффузионное уравнение вдоль траектории конвекции с учётом поля коротации и параметров термосферы. Воспроизведены основные крупномасштабные неоднородности в высокоширотном F слое. Эффект ориентации V_z и V_y ММП проявляется в изменении общей структуры изолиний N_e max, что является следствием топологически различных типов конвективного дрейфа плазменных трубок под действием электрических полей магнитосферной конвекции. Эффект коротации ведёт к появлению застойной области между вечерним и ночным меридианами, что является одной из причин формирования ГИП.

Раздел 2.3 Космическая погода. Руководитель чл.-корр. А.А. Петрукович

1. Исследование зависимости динамики магнитных бурь от типа солнечного ветра

Проведено сравнение зависимости скорости развития магнитной бури $|Dst_{min}|/\Delta T$ (где Dst_{min} - минимум Dst индекса, а ΔT – длительность главной фазы бури) и длительности восстановительной фазы магнитных бурь, генерированных тремя различными типами межпланетных драйверов: (1, 2) области сжатия CIR и Sheath, и (3) тела выброса корональной массы ICME (магнитные облака и Ejecta). Проведенный анализ впервые показал, что длительность восстановительной фазы коррелирует со скоростью развития для бурь, индуцированных Sheath и CIR, и не коррелирует для бурь, индуцированных ICME. Кроме того было показано, что при одних и тех же величинах интеграла индуцированного электрического поля ($E_y = V_x B_z$) солнечного ветра для CIR и Sheath генерируются магнитные бури в ~ 1.5 раза сильнее, чем для бурь, генерированных ICME.

2. Зависимость насыщения потенциала полярной шапки (CPCP) от типа течения солнечного ветра

На главной фазе магнитных бурь величина параметра насыщения Q ($\sim V_a \Sigma_p$), Альфвеновской скорости V_a и Педерсеновской проводимости (оценивается через солнечное радиоизлучение $\Sigma_p \sim F10.7^{1/2}$) зависят от типа течения СВ, вызвавшего магнитную бурю. Самый высокий процент событий с насыщением CPCP (критерий $Q > 2$) предсказан для магнитных бурь от Sh_{MC} . Насыщение CPCP предсказывается в ~ 3.5 раза чаще для бурь, индуцированных межпланетными проявлениями корональных выбросов (ICME), чем для бурь от CIR; в ~ 8.5 раз чаще для бурь от MC, чем от Ejecta; и чаще в ~ 2.5 раза для бурь, вызванных областью сжатия (Sheath) перед корональными выбросами, чем самим ICME.

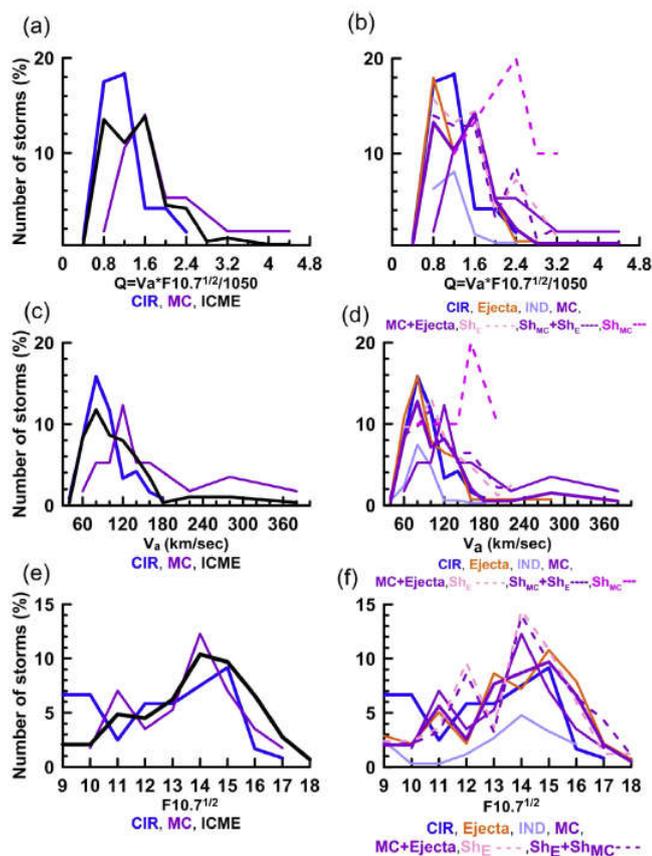


Fig. 2. Distributions of Q , V_a , and $F10.7^{1/2}$ for different types/subtypes of SW drivers.

3. Высокоширотные геомагнитные возмущения в восстановительную фазу магнитной бури

Исследованы особенности дневных высокоширотных геомагнитных возмущений в восстановительную фазу большой магнитной бури 30 мая 2003 г. на основе наблюдений на скандинавском профиле магнитометров IMAGE в условиях больших положительных значений B_z ММП. По данным измерений на спутника CHAMP определено возможное распределение продольных электрических токов системы NBZ и исследованы спектры потоков ионов и электронов, измеренных на спутнике DMSP. Установлено, что спектр высокоширотных (выше $\sim 70^\circ$) геомагнитных пульсаций диапазона Pc5 с периодами в несколько мин не совпадал со спектром флуктуаций в солнечном ветре. Высказано предположение, что наблюдаемые геомагнитные пульсации являются отражением флуктуаций в прилегающих к магнитопаузе турбулентных слоях (низкоширотный погранслой, горловина каспа) или в турбулентном магнитослое.

4. Сезонные вариации инфарктов миокарда в субавроральных широтах и геомагнитная активность

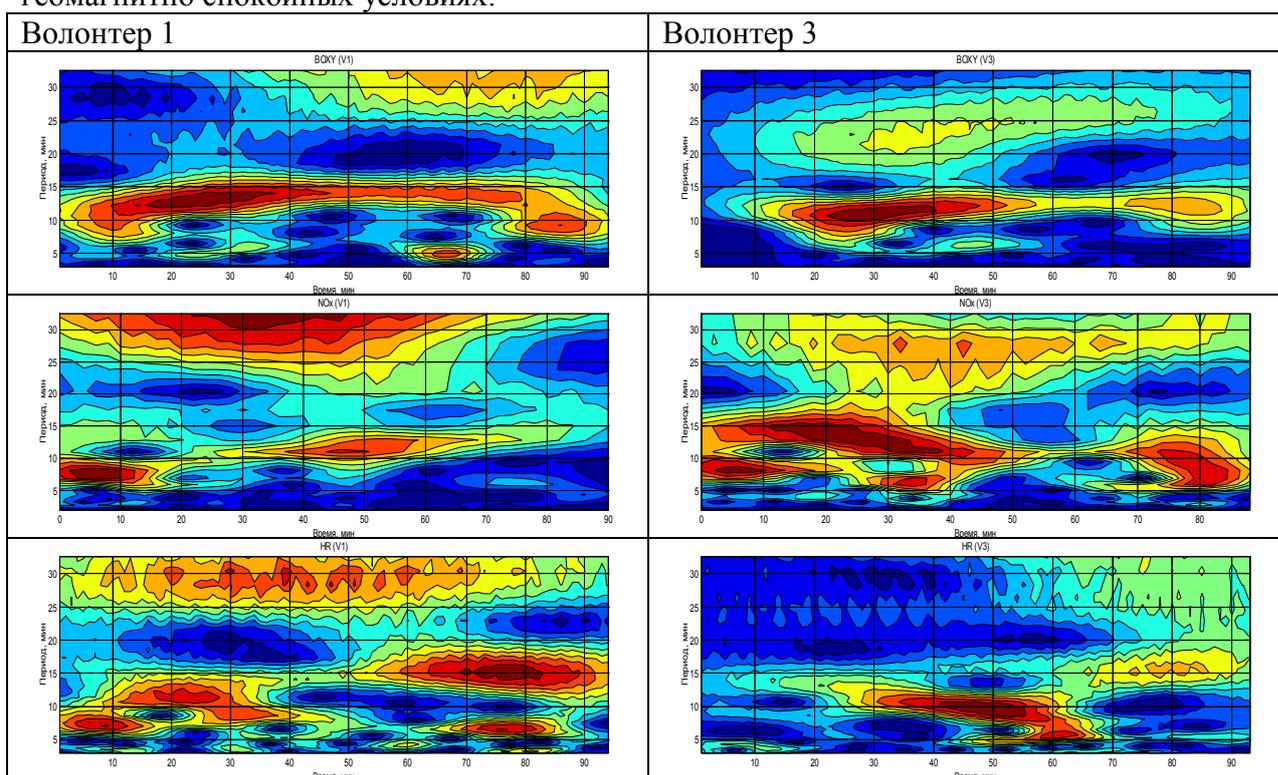
Исследованы сезонные эффекты развития инфарктов миокарда в субавроральных широтах на основе анализа данных о числе вызовов скорой медицинской помощи по поводу инфарктов в г. Якутск. Показано наличие нескольких максимумов, совпадающих с резкими и значительными возрастаниями уровня планетарной геомагнитной возмущенности. На долготе Якутска такие возмущения сопровождалось появлением ночных магнитосферных суббурь, для которых типичны всплески иррегулярных геомагнитных пульсации P11 с периодами (0,5-3,0) Гц, т.е. в том же диапазоне частот, как и биотропные Pc1 колебания.

5. Вариации уровня гормонов у жителей Шпицбергена во время магнитных бурь

Впервые было показано, что в условиях самых северных на Земле круглогодично обитаемых населенных пунктов (Шпицберген) возрастание уровня геомагнитной активности приводит к значимому (вплоть до 30%) изменению уровня секреции ряда гормонов (кортизола, Т3 и Т4) у постоянно проживающих там здоровых людей (980 образцов крови). Результат означает наличие реакции адаптационного стресса при воздействии геомагнитной активности.

6. Оксид азота как биохимический фактор, обеспечивающий синхронизацию сердечного ритма с вариациями магнитного поля

Эксперименты по длительному синхронному мониторингу минутных значений пульса и биохимических показателей крови (текущие концентрации трийодтиронина, кортизола, глюкозы, стабильных метаболитов оксидов азота (NOx)) у практически здоровых добровольцев показали, что в диапазоне 0.5-3 мГц динамика вариаций пульса в наибольшей степени определяется ритмами колебаний уровня NOx в крови, а периоды в вейвлет-спектрах этих физиологических показателей близки к периодам спектров синхронных им вариаций вектора геомагнитного поля в данном частотном диапазоне. (Рис.1) Полученные результаты указывают на оксид азота и его метаболиты в крови как на биохимический фактор, с высокой вероятностью участвующий в развитии процесса тонкой «подстройки» организма к вариациям геомагнитного поля и обеспечивающий синхронизацию сердечного ритма и геомагнитных колебаний в геомагнитно спокойных условиях.



7. Психофизиологические показатели как критерий оценки воздействия низкоинтенсивных естественных и техногенных электромагнитных полей на центральную нервную систему человека.

Разработана информационная система «Универсальный мониторинг экологического здоровья человека», реализованная на веб-сайте www.umon.org.ua и его локального аналога – LUM «Локальный универсальный мониторинг», который обеспечивает не

только регистрацию психофизиологических параметров, но и расширенную интерпретацию полученных результатов. Проанализированы психофизиологические показатели 589 респондентов в возрасте 18 – 58 лет, проживающих в 47 городах мира (основная часть на территории России и Украины); длительность ежедневных измерений от 2-3 недель до 3,5 лет. Проведен мониторинг психофизического здоровья детей-пользователей мобильной связью, который продолжается по настоящее время. Проанализировано 237 детей и подростков в возрасте 6-15 лет из которых 156 находились под наблюдением более 2 лет.

Установлено, что в условиях воздействия естественных электромагнитных полей изменения психофизиологических параметров носят обратимый характер.

Воздействие электромагнитного излучения мобильного телефона носит "накопительный характер" и вызывает ухудшение психофизиологических показателей, степень которого зависит от длительности и режима пользования данным гаджетом

8. Влияние нулевого магнитного поля на сердечнососудистую систему и микроциркуляцию

Воздействие нулевого магнитного поля на сердечнососудистую систему 32 –х здоровых волонтеров исследовалось в лабораторных условиях с помощью установки АРФА (рис.). Характеристики каждого волонтера, такие как капиллярный кровоток, артериальное давление, электрокардиограмма, мониторировались дважды – при экспозиции в нулевом поле (один час) и в «мнимой» экспозиции (один час). Установка Альфа обеспечивала на протяжении нескольких часов стабильный уровень геомагнитного поля, равного 48 мТл (соответствующего широте Москвы) и скомпенсированного геомагнитного поля до уровня ± 10 нТл. Магнитное поле ослабляется более, чем в 10^2 раз на частотах < 5 Гц и более, чем в 10 раз на частоте 50 Гц. Неоднородности составляют менее 1%. Исследования показали, что в нулевом поле существенно уменьшается частота сердечных сокращений и диастолическое артериальное давление. Скорость капиллярного кровотока возрастает на 17% и средняя продолжительность кардиоинтервалов возростала на 88,7% по сравнению с мнимой экспозицией. Полученные результаты могут быть использованы при планировании длительных межпланетных экспедиций и посадке на такие планеты, как Марс и Луна.

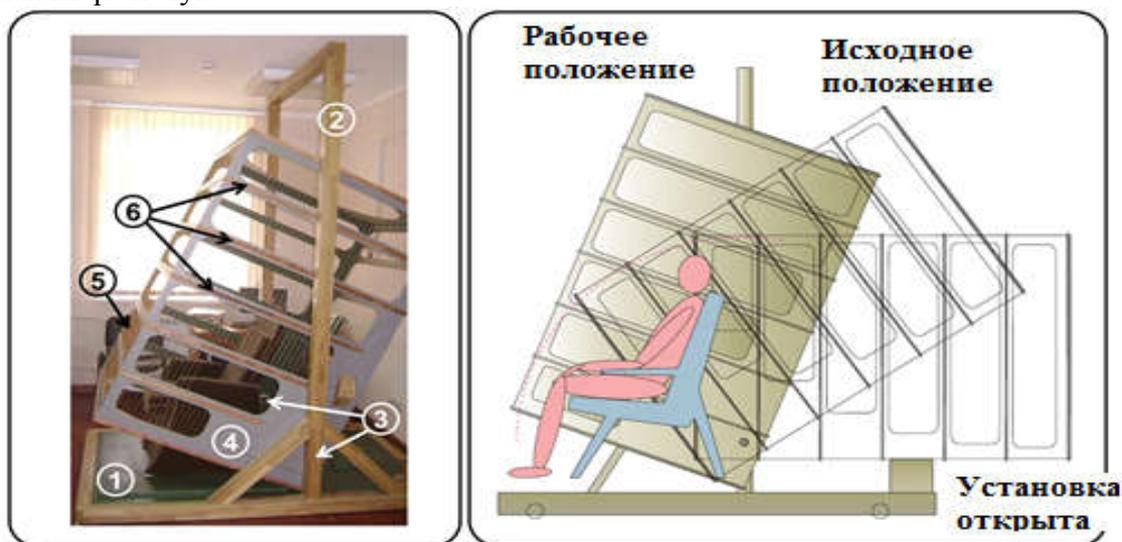


Рис. Установка АРФА: 1 – подвижная платформа с немагнитным креслом внутри камеры; 2 –поддерживающие стойки; 3 – ось для вращения камеры; 4 –камера; 5 – электростатические экраны из проволочной сетки ; 6 – катушки соленоида под изоляционными плитами (7 штук)

9. Численные эксперименты по проверке работоспособности алгоритмов, применяемых в гелиобиологии для восстановления зависимостей

Для проверки алгоритмов аппроксимации гелиобиологических взаимосвязей разработан генератор случайных многомерных зависимостей с заданным радиусом планарности (показатель гладкости). Доказано присутствие линейного тренда у реальных гелиобиологических зависимостей, что позволяет анализировать несостоятельные выборки. Впервые доказана степенная зависимость размера базы данных (числа необходимых прецедентов) от размерности пространства независимых переменных (признаков) для всех видов линейно-локальной аппроксимации, используемой в поисках связи гелиогеофизических и физиологических рядов данных. Показано, что потребуется более чем $1.5 \cdot 10^6$ прецедентов для восстановления зависимости во всего лишь пятимерном пространстве. С целью повышения достоверности выявляемых по несостоятельным базам данных взаимосвязей в настоящий момент нами разрабатываются устойчивые нейросетевые алгоритмы с безытеративным обучением.

Раздел 2.4

Исследование течения солнечного ветра в области гелиосферного ударного слоя. Разработка компьютерной программы, учитывающей влияние анизотропной теплопроводности на течение замагниченной плазмы в области гелиосферного ударного слоя

Разработана трехмерная самосогласованная кинетико-МГД модель взаимодействия солнечного ветра и межзвездной среды. Проанализировано влияние гелиосферного магнитного поля, а также гелиоширотной зависимости параметров солнечного ветра на распределение плазмы. Преимуществом разработанной модели по сравнению с зарубежными аналогами является кинетическое описание распределения нейтральных атомов, а также отсутствие численных эффектов пересоединения магнитных полей. Модель уже успешно применяется для анализа экспериментальных данных, в частности с аппарата IBEX, а также с аппаратов SOHO, HST, Voyagers и др.

Была разработана компьютерная программа, позволяет учесть влияние электронной теплопроводности, действующей главным образом вдоль силовых линий магнитного поля, на структуру гелиосферного ударного слоя. На рисунке а) приведены результаты расчетов с различным коэффициентом теплопроводности $K_{||}$. Несмотря на заметный эффект, достичь требуемого ($\sim 10-100$, в безразмерном виде) значения $K_{||}$ не удастся за счет ограничения на шаг по времени. Вопрос о разработке численного метода, корректно учитывающего изменения параметров за достаточно большой (необходимый) шаг по времени, остается открытым

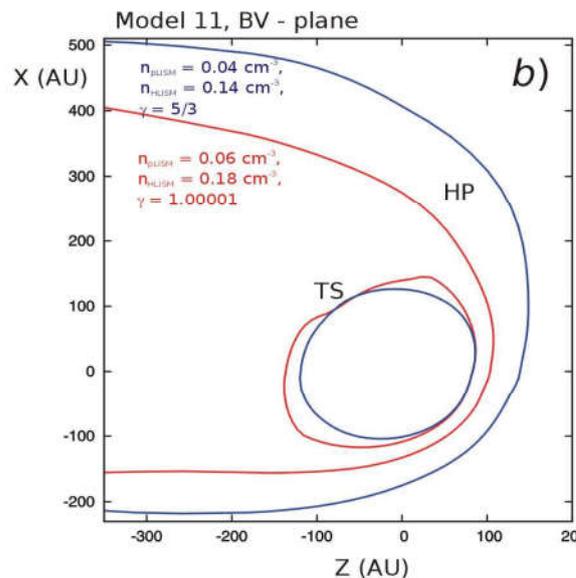
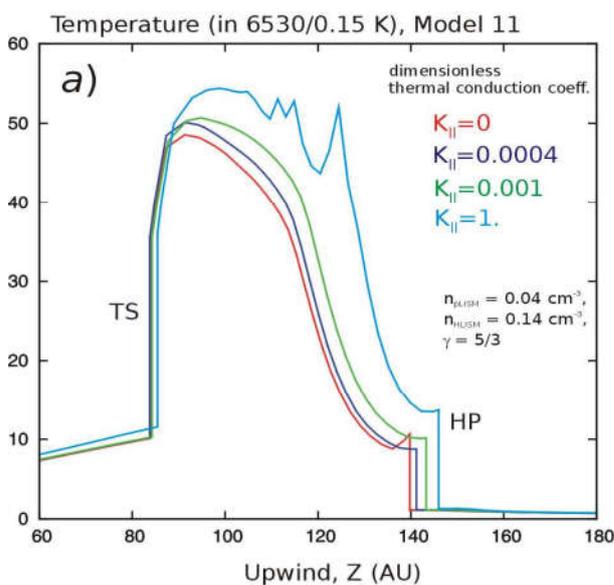


Рис
Рез
ульт
тат
ы
МОД
ели

влияние электронной теплопроводности на положение гелиосферной ударной волны и гелиопаузы.

Анализ данных SOHO/SWAN по рассеянному Лайман-альфа излучению на основании нестационарной кинетической модели распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере

Исследовано влияние цикла солнечной активности на среднее направление движения межзвездных атомов водорода в гелиосфере, определяемое по измерениям рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на аппарате SOHO (прибор SWAN). Для этого было проведено численное моделирование распределения межзвездных атомов водорода в рамках нестационарной кинетической модели, а также рассеянного на атомах Лайман-альфа излучения. Показано, что долгота вектора средней скорости атомов остается примерно постоянной в течение 11-летнего цикла солнечной активности, в то время как широта меняется примерно на 1.2 градуса. Это связано с влиянием силы радиационного давления Солнца, которая значительно меняется в течение солнечного цикла. Полученный результат необходимо учитывать при использовании данных SOHO/SWAN для удаленной диагностики межзвездного магнитного поля, которое приводит к отклонению потока межзвездных атомов водорода от первоначального направления.

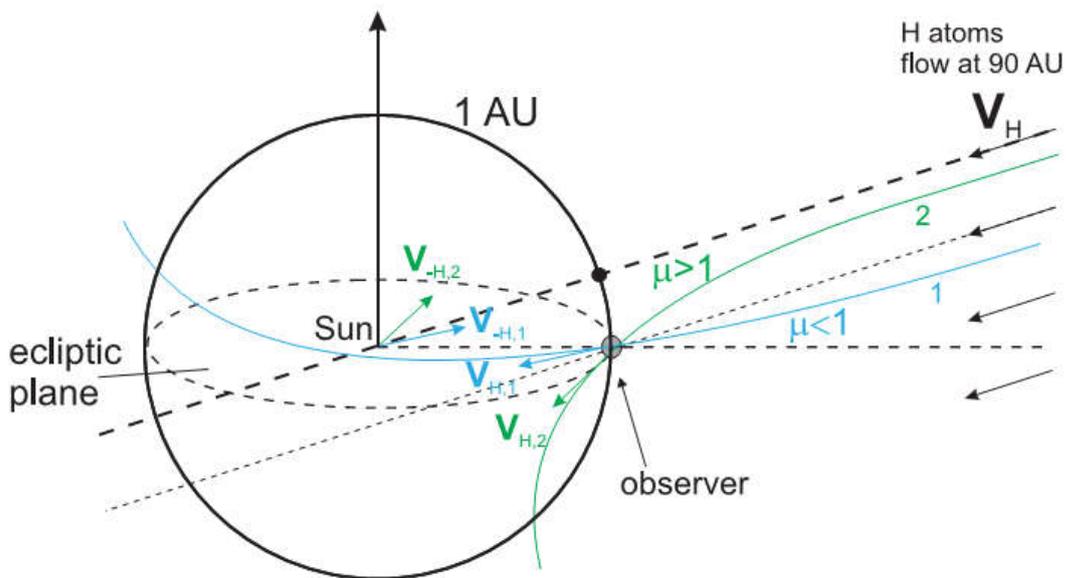


Рис. Качественная картина, объясняющая влияние силы солнечного радиационного давления (которая характеризуется параметром μ) на среднее направление движения атомов водорода в гелиосфере.

К отчету по разделу 2.5

Разработка компьютерной программы расчета структуры области НII.

Проведено моделирование формирования ионизационно-ударного фронта. Решалась система уравнений радиационной газодинамики. Начальные условия выбирались близкими к тем, что рассмотрено в монографии Спитцера (1981). Динамика развития ионизационно-ударного фронта, порождаемого звездой класса O9, показана на рис.1. Результаты расчетов согласуются с классическим представлением о расширении области НII с формированием плотной оболочки.

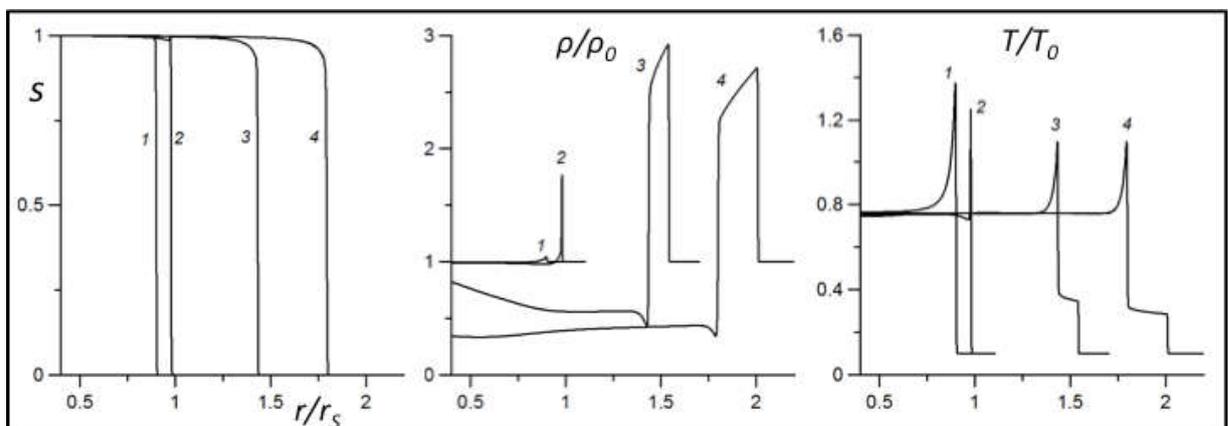


Рис. 1. Степень ионизации s , плотности ρ/ρ_0 и температуры T/T_0 в моменты времени $t/t_0=0.29; 0.56; 0.63; 1.23$ (обозначения 1-4). $T_0=10^4$ К, $\rho_0=1.67 \times 10^{-24}$ г/см³, $r_s=1.36 \times 10^{20}$ см, $t_0=3.4 \times 10^6$ лет.

Разработанная программа расчета взаимодействия радиационного излучения звезд с окружающей средой служит основой для исследования динамики НИИ областей.

Исследования двумерных возмущений ионизационно-ударных фронтов

Выполнено численное моделирование эволюции возмущений в двухслойной сферической оболочке и в плоском слое с двухступенчатым распределением плотности. Показано, что образующиеся в результате неустойчивости ступки имеют качественно различающуюся структуру в зависимости от соотношения плотностей во внутреннем и внешнем слоях оболочки. В оболочках с убывающей наружу плотностью образуются неоднородности, окаймленные плотным газом. Если же более плотный газ находится во внешнем слое, то возникают ядра, окруженные более разреженным веществом. Полученные результаты использованы для анализа расширения области НИИ RCW 82. Наблюдаемые в эмиссии ¹³СО неоднородности во внешних частях этой области имеют контрастно очерченные границы, поэтому расчеты свидетельствуют в пользу модели расширения оболочки с убывающей наружу плотностью

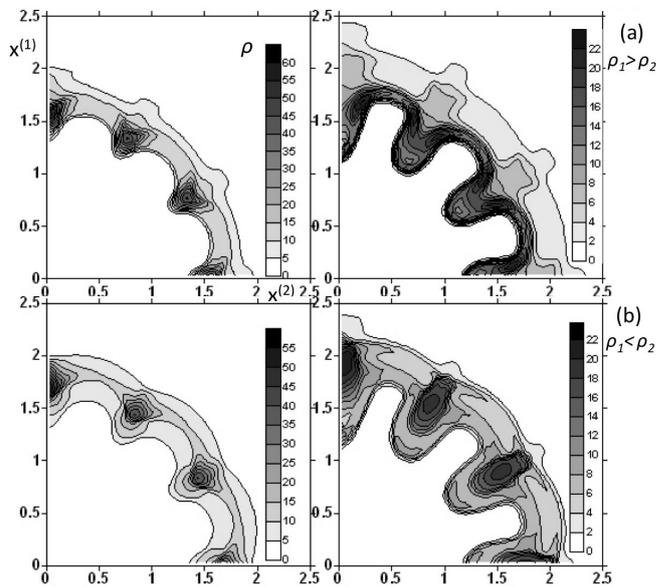


Рис. 2. Изохоры в двухслойной оболочке в момент времени $t=0.5$ (слева) и $t=1$ (справа),

Графики (а): плотность внутреннего слоя и внешнего слоя $\rho_2=10$ (б):

$\rho_1=10, \rho_2=20$. Длина волны начального возмущений $\lambda=\pi/6$.

Обнаружение двух истинных LBV-звезд

Массивные звезды, завершая эволюцию на главной последовательности, могут на время превратиться в яркие голубые переменные (Luminous Blue Variable, LBV) звезды, для которых характерны очень высокие светимость и темп потери вещества, а также значительная фотометрическая и спектроскопическая переменность. Малочисленность известных галактических LBV-звезд и небольшая продолжительность LBV-стадии делают почти каждый из этих объектов уникальным в своем роде, что не только не позволяет надежно установить эволюционную связь между LBV- и другими массивными звездами на поздних стадиях эволюции, но и понять природу самого явления LBV. Обнаружение как можно большего числа LBV-звезд представляет поэтому важное значение для теории

эволюции массивных звезд. В базах данных космического телескопа «Спитцер» и ИК-обзора неба *WISE* нами было обнаружено более сотни компактных кольцевых и биполярных околозвездных туманностей, характерных для массивных звезд на поздних стадиях эволюции. Последующая спектроскопия центральных звезд этих туманностей привела к открытию большого числа кандидатов в LBV-звезды, а проведенный нами спектрофотометрический мониторинг этих кандидатов привел к обнаружению радикальных изменений в спектрах и блеске некоторых из них. За отчетный период нами был подтвержден LBV-статус двух кандидатов в LBV-звезды: WS1 и MN44. На рисунках 1 и 2 показаны, соответственно, эволюция спектра WS1 и кривые блеска MN44, подтверждающие, что обе звезды являются истинными яркими голубыми переменными звездами. С этим открытием число известных в Нашей галактике истинных LBV-звезд увеличилось до семнадцати.

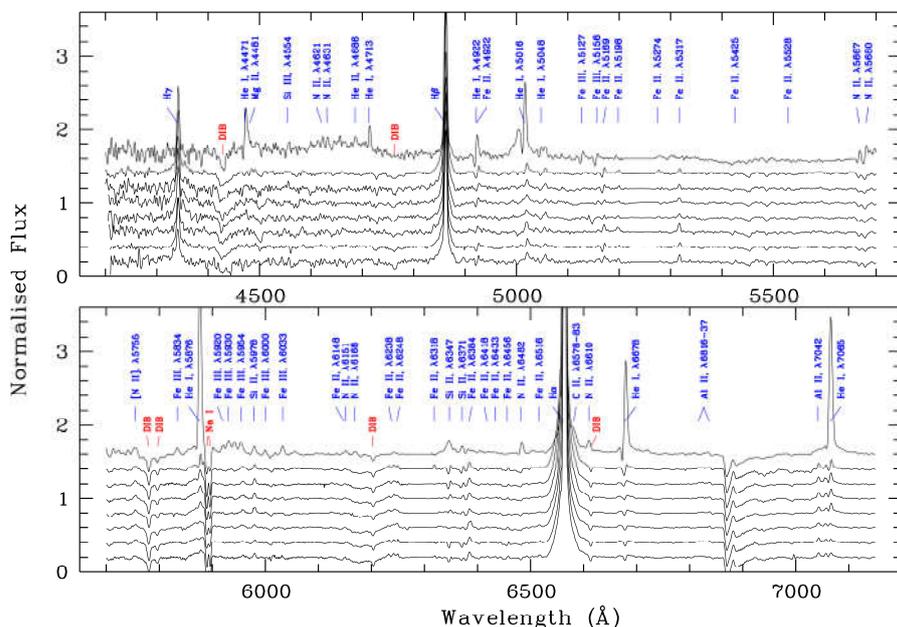


Рисунок 1. Эволюция спектра WS1 в 2011—2014 гг. (Kniazev et al. 2015).

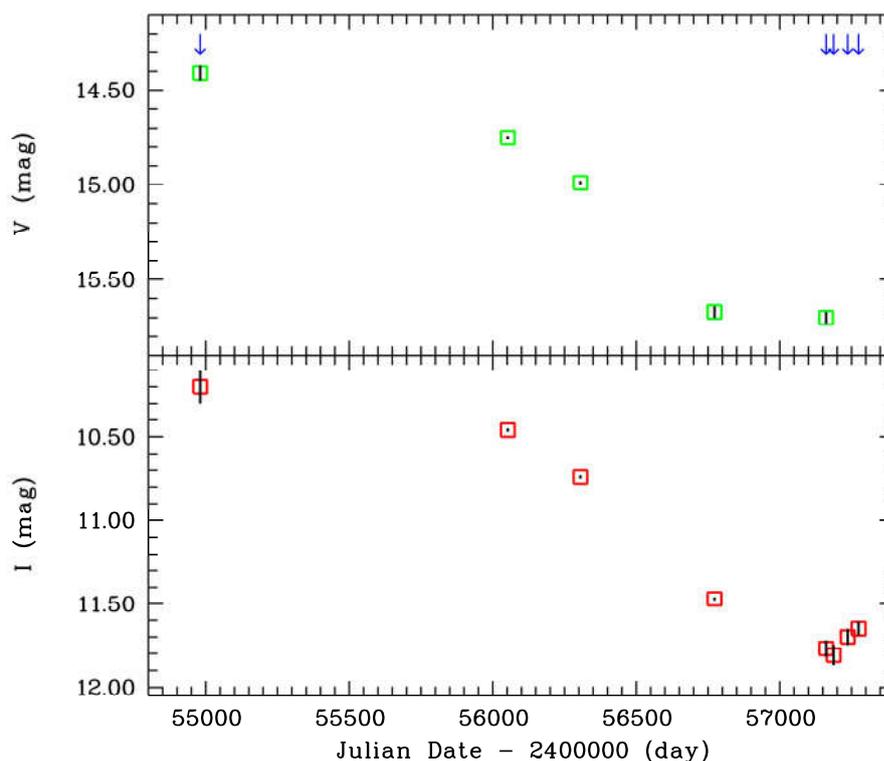


Рисунок 2. Кривые блеска MN44 в V - и I -диапазонах (Gvaramadze et al. 2015).

Исследование голубого сверхгиганта MN18 и биполярной туманности вокруг него, обнаруженных с помощью космического телескопа «Спитцер»

Массивные звезды являются источниками мощного звездного ветра, параметры которого меняются в ходе эволюции звезды. В результате потери массивными звездами значительной доли их исходной массы в виде ветра, вокруг них образуются околозвездные туманности различной формы, наиболее впечатляющими из которых являются биполярные туманности. Хорошо известным примером таких туманностей является туманность в виде трех колец вокруг голубого сверхгиганта Sk-69° 202 -- звезды-предшественницы SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке.

Нами были исследованы голубой сверхгигант MN18 и биполярная туманность вокруг него (см. рисунок 3), открытые с помощью космического телескопа «Спитцер». В работе промоделированы спектры MN18, полученные на 10-м телескопе SALT Южноафриканской астрономической обсерватории и 2.2-м телескопе Общества им. Макса Планка в Южной астрономической обсерватории (Чили), и определены фундаментальные параметры этой звезды. Исследование спектра экваториального кольца биполярной туманности показало повышенное содержание азота, что указывает на то, что кольцо состоит, в основном, из вещества, потерянного звездой. Были определены масса и скорость расширения экваториального кольца вокруг MN18. Сравнение химического состава биполярных туманностей вокруг MN18 и других голубых сверхгигантов показало, что эти туманности могут образовываться как вскоре после того как звезда закончила эволюцию на главной последовательности, так и на заключительных стадиях эволюции,

предшествующих вспышке сверхновой. Был сделан вывод, что образование биполярных туманностей вокруг голубых сверхгигантов скорее всего связано с тем, что эти звезды являются или были членами тесных двойных систем.

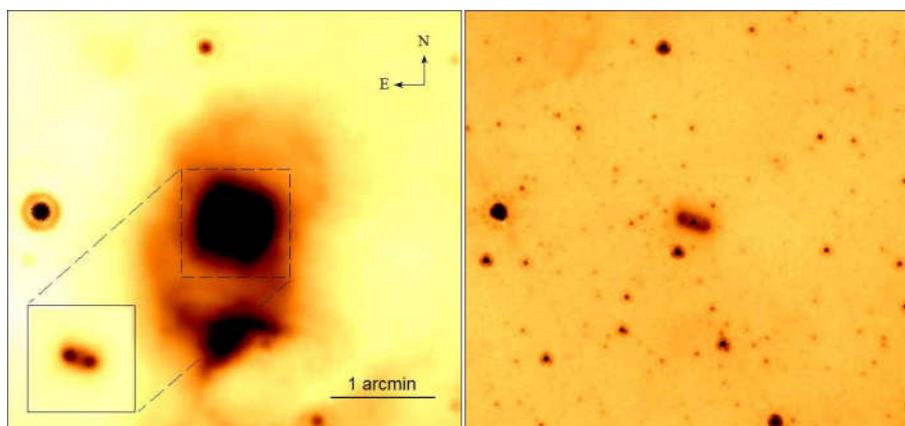


Рисунок 3. Левая панель: инфракрасное изображение биполярной туманности вокруг голубого сверхгиганта MN18 на длине волны 24 μm (вставка показывает экваториальную часть туманности на той же длине волны). Правая панель: инфракрасное изображение экваториального кольца вокруг MN18 на длине волны 8 μm . Оба изображения получены с помощью космического телескопа «Спитцер».

Раздел 2.5

Исследования звезд.

Численное моделирование магниторотационного механизма взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром: исследование МГД неустойчивостей; уравнение состояния горячей сверхплотной материи и нейтринный перенос. Разработка трехмерной МГД моделирования астрофизических задач

Руководитель: проф. Г.С. Бисноватый-Коган, д.ф.-м.н. С.Г.Моисеенко

Расчет кинетических коэффициентов для вырожденных электронов в замагниченной нейтронной звезде на основе решения уравнения Больцмана. Расчет движения замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду.

Руководитель: к.ф.-м.н. О.Д. Торопина, м.н.с. М.В. Глушихина

Движение массивных частиц и тел со спином в гравитационном поле черных дыр вблизи горизонта событий.

Руководитель: к.ф.-м.н. О.Ю. Цупко

Скопления галактик, в присутствии темной энергии.

Руководитель: проф. Г.С. Бисноватый-Коган

Исследование магнито-тормозного излучения пульсаров

Руководитель: проф. Г.С. Бисноватый-Коган, Я.А.Ляхова

Наблюдение оптических проявлений космических гамма-всплесков (GRB). Феноменологическое исследование излучения гамма-всплесков в активной фазе.

Руководитель: к.ф.-м.н. А.С. Позаненко

Исследование магниторотационных сверхновых

Продолжено численное моделирование магниторотационного механизма взрыва сверхновых с коллапсирующим ядром. Магнито-Дифференциально-Вращательная Неустойчивость не развивается при взрыве МР сверхновой в случае, когда начальное магнитное поле слишком большое (например 10(12)Гс).

Используемая нами операторно-разностная ячеечно-узловая (часть сеточных функций задана в узлах сетки, другая часть сеточных функций задана в ячейках сетки) схема на треугольной сетке допускает потерю аппроксимации вблизи оси вращения в цилиндрической системе координат. Аналогичная ситуация возможна и в трехмерном случае для сетки состоящей из тетраэдров в цилиндрической системе координат. Предложено для моделирования магниторотационных астрофизических процессов, реализовать операторно-разностную узловую (все сеточные функции заданы в узлах сетки) схему. Как было показано в Работы Н.В.Арделяна (ВМиК МГУ) использование только узловых функций не приводит к потере аппроксимации вблизи оси вращения. По аналогии с ячеечно-узловым подходом, для случая узловой аппроксимации сформулирована начально-краевая задача. Продолжена разработка трехмерного кода для моделирования МР астрофизических процессов.

Расчет кинетических коэффициентов для вырожденных электронов в замагниченной нейтронной звезде на основе решения уравнения Больцмана. Расчет движения замагниченных нейтронных звезд сквозь неоднородную межзвездную среду.

Наблюдения теплового излучения от нейтронных звезд могут предоставить не только информацию о физических свойствах, таких как величина магнитного поля, температура и химический состав внешних областей звезды, но и информацию о свойствах более плотного вещества внутри звезды. Магнитное поле ограничивает движение электронов в направлении, перпендикулярном к силовым линиям и, поскольку электроны являются основными переносчиками тепла, теплопроводность в этих направлениях подавляется, а вдоль силовых линий остается неизменной. Таким образом, анизотропное распределение температуры возникает в областях с низкой плотностью и в области с промежуточной плотностью (твердая кора). В случае очень сильных магнитных полей, эта анизотропия может присутствовать и в малоизученных внутренних областях нейтронной звезды. Теплопроводность это основная величина, необходимая для вычисления отношения между внутренней температуры нейтронной звезды и эффективное температурой её поверхности, это отношения влияет на тепловую эволюцию звезды и спектров её излучения. Для расчета теплопроводности, необходимо знать транспортные свойства плотной материи, где электроны являются вырожденными и образуют почти идеальный ферми-газ, а ионы невырождены и образуют кулоновскую жидкость или кулоновский кристалл. В таких условиях, электроны наиболее важные теплоносители, и теплопроводность определяется диффузией электронов.

Решено уравнение Больцмана методом Чепмена-Энскога для электронов в произвольно вырожденной плазме. Получен тензор теплопроводности с использованием разложения по трем полиномам, и, на примере Лоренцевого газа, показано, что метод имеет хорошую

сходимость к точному решению. Наши результаты показывают, что в более точном подходе влияние магнитного поля существенно отличается от использованного предыдущими авторами, в тех случаях, когда вырождение не является экстремальным.

При помощи численного МГД моделирования мы исследовали движение нейтронной звезды с магнитным полем через неоднородную среду, взаимодействие магнитосферы звезды с веществом межзвездной среды и влияние плотности среды на форму хвоста магнитосферы.

Мы получили картину течения вещества для разных параметров магнитного поля звезды, скорости движения звезды и плотности межзвездной среды. При используемых параметрах радиус магнитосферы звезды существенно больше аккреционного радиуса ($R_m > R_{acc}$), что соответствует режиму георотатора для одиночных нейтронных звезд.

Сначала при движении звезды через однородную среду, силовые линии магнитного поля вытягиваются в направлении потока вещества вне магнитосферного радиуса R_m и образуют длинный хвост магнитосферы. В хвосте наблюдается пересоединение магнитных силовых линий. Затем звезда проходит через неоднородную межзвездную среду (плотное холодное облако), при этом 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. Картина течения вещества показана на Рис. 1. Заливкой показан логарифм плотности, стрелки соответствуют векторам скоростей, сплошные линии отображают силовые линии магнитного поля.

Результаты моделирования согласуются с существующими наблюдениями пульсаров PSR J1509-5850 и PSR J1747-2958.

Движение вращающихся пробных частиц в гравитационных полях черных дыр

Рассматривались орбиты классических частиц с собственным моментом вращения (спином) в гравитационном поле шварцшильдовской и керровской черных дыр. Были исследованы последние устойчивые круговые орбиты частиц со спином. Были аналитически найдены малые по спину поправки к параметрам последних устойчивых круговых орбит, для произвольного керровского параметра a , в случае когда спин черной дыры, спин пробной частицы и орбитальный угловой момент коллинеарны. Найдены радиус, полный угловой момент, энергия и орбитальная частота для таких орбит. Подробно рассмотрены случаи шварцшильдовской черной дыры, медленно вращающейся керровской черной дыры и предельной керровской черной дыры. Для случая черной дыры с предельным вращением и со-вращающейся орбитально пробной частицей было получено, что радиус и угловая орбитальная частота на последней устойчивой орбите не зависят от спина частицы, в то время как величины энергии и полного момента зависят.

На картинке проиллюстрировано, как меняется радиус последней круговой устойчивой орбиты частицы при наличии у нее собственного вращения (спина), в случае шварцшильдовской и керровской черных дыр.

Скопления галактик, в присутствии темной энергии.

Получено точное аналитическое решение для распространения сильной ударной волны в расширяющейся вселенной, обобщающее известное решение Л.И. Седова, в котором рассматривалась покоящаяся среда без гравитации.

Исследованы свойства решения для движения объектов в двойной системе в присутствии темной энергии. Решение применимо для описания относительного движения двух

гравитационно связанных скоплений галактик в нашей вселенной с преобладание темной энергии.

Исследование магнито-тормозного излучения пульсаров

Задача посвящена исследованию поляризационных свойств излучения заряженных частиц в циклотронном и релятивистском дипольном режимах. Исследуя свойства двух режимов излучения заряженных частиц в магнитном поле, требовалось обнаружить, каким образом можно различить их в наблюдениях. Это решило бы одну из проблем описания рентгеновского пульсара Геркулес X-1, а также могло быть использовано в исследовании других рентгеновских источников.

Показано, что поляризационные характеристики циклотронного и релятивистского дипольного режимов заметно отличаются друг от друга. Это позволяет в соответствующих наблюдательных экспериментах определить происхождение так называемой циклотронной линии в спектре рентгеновских источников, таких как рентгеновский пульсар Геркулес X-1, что, в свою очередь, может быть использовано для построения самосогласованных моделей этих объектов.

Исследование гамма-всплесков земного происхождения на основе данных обсерватории RHESSI: определение мертвого времени, формы импульса и функции светимости.

Наблюдение оптических проявлений космических гамма-всплесков (GRB). Феноменологическое исследование излучения гамма-всплесков в активной фазе.

Оптические наблюдения 54 областей локализации гамма-всплесков, раннего послесвечения, их родительских галактик и сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками проводились в течение 2015 года в обсерваториях участвующих в международной сети наблюдения гмма-всплесков: в США (Нью-Мексико), России (Усурийск, Благовещенск, Монды, Терскол, КраО, Ростов на Дону, Кисловодск), Казахстане (ТШАО), Армении (Бюракан), Узбекистане (Майданак), Монголии (Хурелтогот), Украине (Харьковский университет), Грузии (Абастумани). В частности, открыта сверхновая, ассоциированная с GRB 150818A. Она найдена фотометрическим методом (GCN 18205) и подтверждена спектроскопически зарубежными коллегами (GCN 18213).

Закончена обработка наблюдений и исследование гамма-всплеска GRB 130831A, найдены физические параметры возможного источника продленного излучения. По результатам опубликована статья в соавторстве.

По программе быстрых наблюдений гамма-всплесков проведены наблюдения раннего оптического послесвечения GRB 151027A (GCN 18480), где наблюдения были начаты через 79 с после начала всплеска, и получены ранние пределы для GRB 151118A (GCN 18618), GRB 150120A (GCN 17341) и GRB 150203A (GCN 17399). Наблюдения были начаты через 122, 72 и 72 с после начала гамма-всплеска, соответственно.

Проведено исследование влияния мертвого времени при регистрации гамма-всплесков земного происхождения (TGF) в данных эксперимента RHESSI путем моделирования нестационарных пуассоновских потоков.