

Некоторые результаты проекта ИНТЕРБОЛ

1. Открытие нового явления - пучков почти моноэнергетических ионов (ПМИ) с энергиями 50-200 кэВ в переходной области и солнечном ветре. Статистический анализ свойств ПМИ показал, что они могут быть ионами солнечного ветра, ускоренными во всплеске электростатического поля на магнитопаузе или на ударной волне. Открытие в ходе эксперимента ДОК-2 (ИНТЕРБОЛ, Хвостовой зонд) нового явления - пучков почти моноэнергетических ионов (ПМИ) с энергиями 50-400 кэВ в переходной области и солнечном ветре. Спектры ПМИ состоят из 1-3 узких линий, значения энергий которых почти не меняются за время события (~ 1 мин). За 3 года работы было зарегистрировано более 200 таких событий. Отношение энергий пиков в спектре составило 1:2 для спектров с 2 пиками и 1:2:(5-6) для спектров с 3 пиками. Это позволило предположить, что ПМИ могут быть ионами солнечного ветра H^+ , He^{++} и $(C,N,O)^+(5-6)$, ускоренными во всплеске электростатического поля на магнитопаузе или на ударной волне. Была предложена модель ускорения ПМИ, объясняющая их основные свойства. Эта модель предполагает существование механизма концентрации разности потенциалов ~ 100 кэВ, существующей на магнитосфере (от конвекционного электрического поля) в малой области на магнитопаузе с размерами ~ 1000 км. Открытие ПМИ стало возможным благодаря высокому энергетическому разрешению аппаратуры ДОК-2.
2. Открыт турбулентный пограничный слой (ТПС) как постоянная структура на высокоширотной границе магнитосферы. Статистика по магнитному полю (эксперимент АСПИ на КА ИНТЕРБОЛ-1) за март 1997- март 1998 гг. показывает, что в 83%

случаев регистрируются КНЧ волны с амплитудой свыше 10 нТ, причем над полярным каспом ТПС может быть аппроксимирован пятном размером 6 радиусов Земли (R_e) с усредненным за год максимумом амплитуды 37 нТ в диапазоне 0,05 – 2 Гц. Оценки диффузии показывают, что, по порядку величины, ТПС может обеспечить наполнение солнечной плазмой как каспов, так и низкоширотных погранслоев. ТПС простирается также и в геомагнитный хвост до расстояний $X = -20 R_e$, причем амплитуда магнитной турбулентности спадает с расстоянием от Земли. Однако, эта амплитуда является достаточно высокой, чтобы обеспечить диффузию солнечной плазмы в ТПС до расстояний $X = -15 R_e$. Предварительное сравнение данных с нескольких космических аппаратов (ИНТЕРБОЛ-1,2, ПОЛАР, ГЕОТЕЙЛ, ВИНД и др.) показывает, что ТПС обеспечивает заполнение магнитосферы солнечной плазмой параллельно с глобальным пересоединением магнитных силовых линий. В условиях возмущенного геомагнитного поля и солнечного ветра турбулентная диффузия может иметь место также и на низкоширотной магнитопаузе. Для сравнения, мощность колебаний магнитного поля на головной ударной волне в среднем за год в 1,3 раза меньше, чем в ТПС.

3. Определена структура плазмы и магнитных полей в локализованных магнитных силовых трубках (FTE), образующихся при пересоединении межпланетного и магнитосферного магнитных полей, которая принципиально отличается от ранее исследованных. По данным наблюдений прибора СКА-1 на хвостовом зонде ИНТЕРБОЛ 15 февраля 1996 г была проанализирована плазменная структура магнитосферного FTE. Показано, что она принципиально отличается от структуры FTE, детально проанализированной в литературе по результатам измерений на спутнике AMPTE-UKS. В

отличие от случая симметричного FTE, интерпретированного как прохождение спутником AMPTE-UKS выступа в слое нестационарного пересоединения, FTE, наблюдавшийся на спутнике ИНТЕРБОЛ, имеет несимметричный характер. Детальный анализ плазменной структуры FTE показывает, что его более плотная головная часть менее разогрета и имеет большую и более стабильную скорость, чем хвостовая часть. Хвостовая часть более турбулентна, чем головная часть. Дискретные плазменные образования в низкоширотном пограничном слое, одними из которых являются обсуждаемые FTE, составляют монотонную последовательность, в которой они сохраняют двойную структуру, но в то же время закономерным образом меняют свою концентрацию и температуру, одновременно теряя конвективную скорость. Это явление интерпретируется как внедрение плазменных сгустков в низкоширотный пограничный слой в результате нестационарного пересоединения, их отрыв от потока плазмы в переходной области и дальнейшая ассимиляция в магнитосфере. Часть этих дискретных плазменных образований имеет магнитную структуру FTE.

4. Внутренняя изменчивость плазменных распределений в магнитосферном хвосте. Обнаружен новый эффект вариаций магнитосферного хвоста с характерным временем 3-5 мин. даже при стационарных условиях в солнечном ветре. Результаты полного кинетического крупномасштабного моделирования равновесных состояний магнитосферного хвоста при длительном южном направлении ММП привели к необычному результату: даже при абсолютной стационарности внешних плазменных источников, пополняющих хвост, он никогда не достигает полностью равновесного состояния. Внутренняя изменчивость проявляется в квазипериодических колебаниях

удалённой X-линии между двумя предельными положениями (40-70 радиусов Земли в типичных расчётах) с периодом 4-5 минут.

Физический механизм таких колебаний связан с неадиабатичностью ионов, переносящих ток в области ускорения вблизи возникающей X-линии. Сильное ускорение приводит к потере токопереносящих частиц и разрыву токового слоя. Нейтральная линия возникает в другом месте до тех пор, пока конвекция не принесёт новые частицы, способные восстановить ток и воссоздать предшествующую конфигурацию. Подобная переменность, отражающая внутреннюю динамику частиц в хвосте, очень часто наблюдается при измерениях на ИСЗ ИНТЕРБОЛ-1 и других КА в так называемые спокойные периоды. Учтено и влияние электронной компоненты плазмы на этот процесс. Электроны приводят к уширению токового слоя и некоторому замедлению внутренних колебаний.

5. Получены убедительные доказательства открытой топологии магнитосферы в районе каспа и существование пересоединения на магнитных силовых линиях полярной шапки при северном межпланетном магнитном поле.

Исследована эволюция функции распределения ионов вблизи магнитопаузы в области внешнего каспа по мере продвижения вглубь магнитосферы - от D-типа к плоской и далее к имеющей форму тора. Эта эволюция подтверждает справедливость открытой модели магнитосферы и объясняется постепенным “закрытием” области “открытой” магнитопаузы для данной силовой линии в процессе конвекции. Подтверждено наличие пересоединений к северу от каспа при северном направлении межпланетного магнитного поля и соответственно существование открытой магнитосферы и при этих условиях. Экспериментально показано, что положение области

пересоединения зависит от ориентации ММП. Любое изменение направления ММП ведет к изменению топологии внешнего поля и к изменению характеристик потоков частиц. При быстрых изменениях ММП внешние области каспа кажутся турбулентными. В области внешнего каспа, в области предсказанного моделями минимума геомагнитного поля обнаружена область с резкой границей, содержащая надтепловую плазму с пичч-углами 90 град.

6. Анализ данных полученных на КА ИНТЕРБОЛ-1 показал, что в турбулентном пограничном слое (ТПС) на высокоширотной границе магнитосферы наблюдается частичное превращение кинетической энергии солнечного ветра в тепловую. Поток солнечного ветра, попадающий над каспом в воронки с низким магнитным давлением, может быть частично “захвачен” в этих воронках. Захваченная часть потока возбуждает турбулентность снаружи магнитопаузы за счет многокаскадной диссипации кинетической энергии потока плазмы. Диссипация энергии происходит не однородным образом, а в когерентных нелинейных альфвеновских вихрях, обволакивающих нагретую почти размагниченную плазму (т.н. “диамагнитные пузыри”, ДМП). Таким образом, ТПС напоминает кипящую жидкость – двухфазовую среду, состоящую из замагниченной плазмы солнечного ветра и ДМП. Данные за март 1997- март 1998 гг. показывают, что ДМП регистрировались более чем в 82% случаев, их области регистрации статистически совпадают с ТПС, хотя локально ДМП проникают в магнитосферу и переходную область за пределы ТПС. В среднем магнитное поле внутри ДМП меньше в 8,3 раза, чем снаружи, средний нагрев ионов больше в 1,5-3 раза, электронов – более чем в 1,5 раза. Сравнение данных ИНТЕРБОЛ-1 и ГЕОТЕЙЛ 27 января 1997 г. показывает, что на высоких широтах уже за ТПС в переходной области кинетическая и тепловая энергия плазмы равны,

тогда как на низких широтах кинетическая составляет 20% от тепловой, причем их сумма на 15 % выше на высоких широтах. Это свидетельствует о существенном влиянии ТПС не только на диффузию плазмы но и на обтекание ею магнитосферы.

7. Исследован ионный состав так называемого “ионного фонтана” в каспе- области выноса в магнитосферу сверхтепловых ионов полярной верхней ионосферы на дневной стороне. Показано, что “ионный фонтан” является результатом эффективного нагрева тепловых ионов H^+ , He^+ , O^+ с образованием “конических пучков” в узкой области широт на высотах, в основном, 2000-5000 км, но этот нагрев/ускорение ионов продолжается, по крайней мере, до высот $\sim 10\ 000$ км. Источником этого нагрева являются процессы передачи энергии тепловым ионам от энергичных частиц магнитослоя, вторгающихся в магнитосферу в каспе, через взаимодействия заряженных частиц с волнами
8. На полярной границе аврорального овала в стационарных условиях обнаружена “плазменная стенка” с плотностью тепловой плазмы, на порядок превышающей плотность над авроральным овалом и над полярной шапкой. Эта структура в тепловой плазме играет важную роль для условий генерации и распространения волн в магнитосферной плазме.
9. Обнаружено новое явление - ускорение вверх электронов на полярной границе овала полярных сияний до энергий более 20 кэВ. Эти процессы ускорения развиваются в условиях турбулентной плазмы магнитосферы и сопровождаются продольным ускорением части электронов плазменного слоя как вниз, так и вверх до энергий порядка кэВ. Отмечено, что когда пучок энергичных восходящих

электронов существует в течение нескольких минут, происходит мощная вспышка интенсивности частиц в широком диапазоне энергий, после которой восходящий пучок появляется вновь, причем с большей интенсивностью, чем до вспышки. Орбита спутника неоднократно позволяла наблюдать такую временную эволюцию восходящего пучка в течение 10-30 минут приблизительно в одной и той же области магнитосферы на полярном краю послеполуночного овала полярных сияний. Одно из возможных объяснений этого эффекта - дестабилизация дальней области хвоста магнитосферы (куда проектируются магнитные силовые линии из области ускорения электронов) энергичными электронами, ускоренными над областью полярных сияний, т.е. последовательность процессов, обратная общепринятой для возбуждения вспышек полярных сияний.

10. Обнаружено, что дисперсионные структуры ионов H^+ и He^+ , занимают диапазон энергий вплоть до тепловых и сверхтепловых энергий ($\sim 1-50$ эВ). Они возникают на высотах в несколько радиусов Земли и более. В основном, они возникают при вспышечных прорывах в магнитосферу обтекающей ее горячей плазмы солнечного ветра. Но показано, что наряду с этим, по крайней мере частично, наблюдаемая картина формируется в результате нагрева и локального ускорения частиц тепловой плазмы. Нагрев и ускорение тепловых ионов, вероятно, являются результатом взаимодействия разреженной тепловой плазмы с интенсивными пучками энергичных частиц, генерируемыми в околоземном плазменном слое на ночной стороне, либо во внешнем каспе и/или на магнитопаузе на дневной стороне. Во многих случаях эти дисперсионные структуры ионов сопровождаются коническими пучками ионов H^+ , He^+ и O^+ , ускоренными в верхней ионосфере.

11. Одновременными измерениями с двух спутников ИНТЕРБОЛ-1 и ИНТЕРБОЛ-2 в условиях прохождения магнитного облака 11 декабря 1996 г. показано, что при резкой смене направления межпланетного магнитного поля (ММП) с южного на северное во всей высокоширотной магнитосфере в течение всего нескольких секунд (около 01ч.47.) резко возросла интенсивность электронов с энергиями более 20 кэВ. Процессы ускорения и распространения ускоренных высокоэнергичных частиц в столь широкую область околоземного пространства могут быть обусловлены ее радикальной перестройкой в условиях резкой смены ММП

12. Наблюдения на ИНТЕРБОЛе с помощью СКА-1 позволили зарегистрировать ряд аномалий потока перед фронтом ударной волны и в переходной области. Эти аномалии имеют те же признаки, которые отмечались раньше другими исследователями: расположение вблизи токового слоя, разделяющего квазипараллельный режим ударной волны от квазиперпендикулярного, сильное отклонение потока от направления солнечного ветра, иногда вплоть до солнечного направления, сильный нагрев, невысокая плотность и очень высокая температура, низкая средняя величина магнитного поля и сильные его флуктуации и ряд других. Новые результаты на ИНТЕРБОЛе включают в себя: (а) существование четкой структуры с менее горячей лидирующей областью, задней сильно разогретой областью и разделительной областью с основным ионным пучком типа солнечного ветра, (б) наличие двух ионных пучков в аномалии потока, что свидетельствует о важной роли взаимодействия между солнечным ветром и отраженными ионами, и (в) наблюдение серии аномалий потока в переходной области вплоть до магнитопаузы.

13. Измерения, проведенные вблизи границы магнитосферы на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 24 июля 1996г. показали два необычно быстрых прохода магнитослоя (от ударной волны до магнитопаузы) мимо спутника в течение менее 8 минут. Столь необычно быстрое пересечение магнитослоя было вызвано распространением в антисолнечном направлении поверхностной волны на магнитопаузе с амплитудой, превышающей 5 RE. Такая волна может быть следствием сильного и кратковременного уменьшения давления, связанного с формированием области горячего разреженного и отвернутого течения плазмы, быстродвигающейся в направлении, перпендикулярном линии Солнце-Земля, и медленно - в антисолнечном направлении.

14. На основе анализа одновременных наблюдений на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 и его субспутнике МАГИОН-4 доказано, что быстрые и большие движения магнитопаузы с амплитудой порядка 0.1-2Re определяются не изменениями давления невозмущенного солнечного ветра (и направления межпланетного магнитного поля), а вариациями потока плазмы в магнитослое вблизи магнитопаузы.

15. На основе измерений, выполненных в проекте ИНТЕРБОЛ, развита модель инициации суббури. Суббуря подготавливается на фазе накопления энергии в хвосте, когда происходят два независимых процесса - сжатие хвоста (т.е. уменьшение его толщины) и его растяжение (уменьшение нормальной компоненты). Если первый процесс преобладает (ближние к Земле области хвоста) инициируется токовая неустойчивость, ведущая к срыву хвостового тока и его ответвлению в ионосферу. При этом суббуря развивающаяся в хвосте должна иметь яркие наземные проявления (брейкар) как в магнитных, так и оптических наблюдениях. Во втором случае, более характерном

для удалённых областей хвоста, развивается неустойчивость разрывного типа, ведущая к сильной перестройке топологии магнитного хвоста, но не имеющая ярких наземных проявлений. Такие явления хорошо известны и носят название "Псевдобрейка П". Теория позволяет с единой точки зрения взглянуть на эти, кажущиеся очень разнородными, процессы.

1. Предложено объяснение существования турбулентного пограничного слоя (ТПС) на высокоширотной границе магнитосферы.

Исследования пограничного слоя с помощью нескольких космических аппаратов показывают, что взаимодействие потоков плазмы переходной области с высокоширотной магнитопаузой включает в себя слой, который характеризуется сильной нелинейной турбулентностью – турбулентный пограничный слой (ТПС). Этот слой снизу не ограничивается областью стагнации каспа, а распространяется в направлении хвоста до расстояний по оси X вплоть до $-15 R_e$, усиливаясь вдоль перехода от мантии к низкоширотному пограничному слою. Регистрируются магнитные пузыри, в которых происходит существенный нагрев плазмы переходной области (до ~ 300 Эв). Волны, наблюдаемые в ТПС имеют альфвеновскую природу, на что указывает их эллиптическая поляризация, а также их фазовая скорость, величина которой близка к альфвеновской. Многопутниковые измерения, полученные 29 мая 1996, показывают, что ТПС и касп имеют большую пространственную и временную протяженность. Сверхзвуковой поток плазмы между магнитопаузой и вращательным разрывом, который охватывает пересоединенные линии магнитного поля в переходной области, соответствует теории каспа на основе сопла Лавалья. Обратный скачок скорости потока в дозвуковой режим, по всей видимости, объясняется взаимодействием с препятствием, которым в данном случае является увеличивающаяся плотность силовых линий магнитного поля, связанных с

хвостом магнитосферы, а не известный механизм, основанный на нагрузке ионами, вытянутыми из ионосферы. Таким образом, наблюдаемый турбулентный пограничный слой возникает в результате взаимодействия потока ионов в токовом слое с деформированной вблизи каспа магнитопаузой.

2. Получена оценка поперечной корреляционной длины структур солнечного ветра на основе многофакторного анализа параметров солнечного ветра по данным различных космических аппаратов.

Проведен многофакторный анализ корреляции потоков ионов солнечного ветра на основе многоспутниковых измерений. Путем сопоставления одновременных наблюдений потоков ионов солнечного ветра на широко разнесенных космических аппаратах (ИНТЕРБОЛ-1, WIND, IMP 8) получена зависимость коэффициента их кросс корреляции от расстояния между аппаратами и от параметров плазмы. Показано, что корреляция потоков ионов слабо спадает при увеличении от нуля до $100 R_e$ расстояния между аппаратами в плоскости, перпендикулярной направлению движения солнечного ветра. Это позволило получить оценку "поперечной" корреляционной длины структур солнечного ветра в диапазоне 3-6 млн. км. Показано, что наиболее сильно указанная корреляция зависит от вариабельности потока (или плотности) ионов - с ростом уровня вариаций корреляция увеличивается. Обнаружено, что корреляция потоков для солнечного низкоскоростного ветра заметно выше, чем для высокоскоростного.

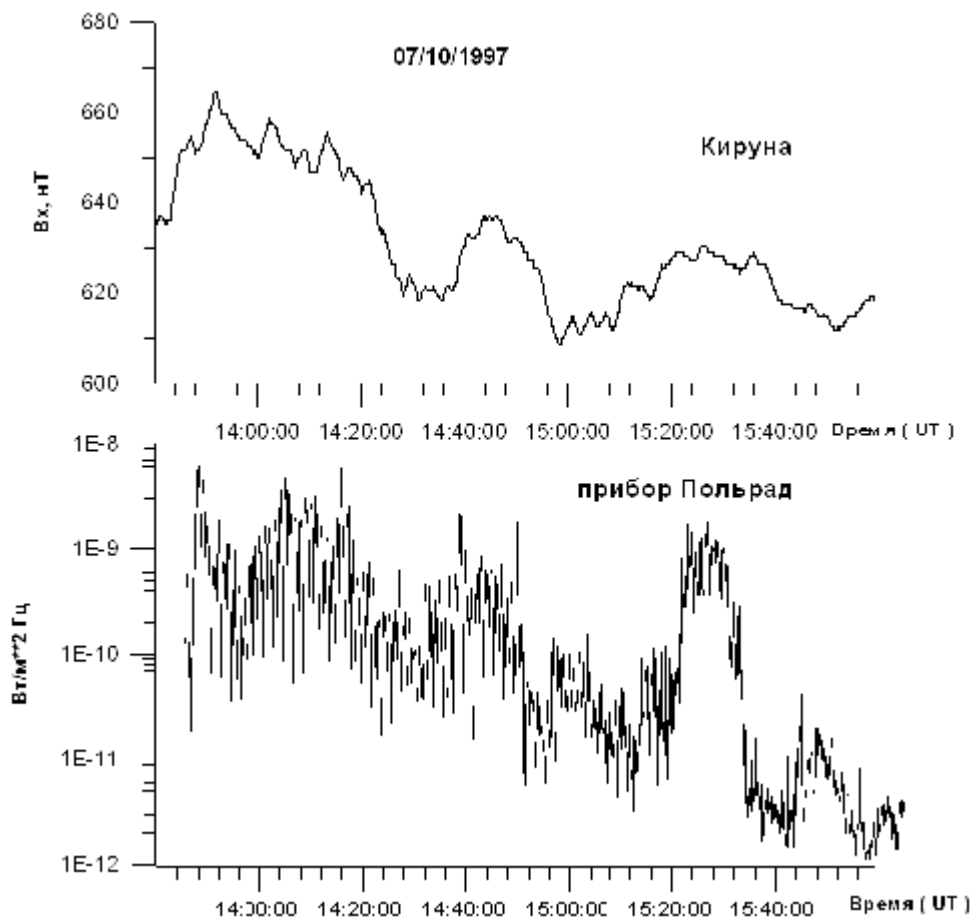
4. Показано что достоверность измерения вариаций солнечного ветра на удаленном КА возрастает с увеличением амплитуды события. Предложен и реализован алгоритм предсказания геомагнитной активности непосредственно по измерениям солнечного ветра.

Своевременные измерения параметров солнечного ветра (СВ) необходимы для выработки надежного прогноза геомагнитной активности. Спутник расположенный в точке либрации L1, позволяет выполнять такие измерения непрерывно и с запасом по времени около 1 часа. Однако, из-за неоднородностей в структуре СВ, характеристики солнечного ветра, непосредственно взаимодействующего с магнитосферой Земли, могут отличаться от таковых, измеренных в удаленной точке структуры.

Корреляционный анализ измерений солнечного ветра, проводившийся в предыдущих исследованиях, выявил существование значительных различий (низких коэффициентов корреляции) между измерениями на двух КА. Однако, такой подход не позволяет определить насколько зарегистрированные вариации существенны в геофизическом смысле, то есть с точки зрения их влияния на энергетику процесса взаимодействия СВ и магнитосферы Земли. В данном исследовании сравнение измерений СВ проводилось после вычисления эpsilon-параметра (E) – интегральной характеристики СВ, имеющей геофизический смысл (пропорциональной количеству энергии попадающему в магнитосферу). В результате анализа одновременных измерений на КА WIND и Интербол-1 в течение 1996-1998 годов было показано, что вероятность регистрации одинаковых (в пределах 15%) значений E возрастает с увеличением E , и близка к единице для $E > 1016$ Дж (соответствующих магнитной буре). Для событий с амплитудами, соответствующими магнитной суббуре ($E \sim 1015$ Дж), эта вероятность составляет около 60%. Зависимость ошибок от величины E может быть объяснена тем, что структуры солнечного ветра, вызывающие магнитные бури, генерируются во время солнечных вспышек и имеют крупномасштабный характер. События меньшей амплитуды порождаются более мелкомасштабными внутренними вариациями солнечного ветра. На основе проведенного исследования разработан алгоритм предсказания уровня геомагнитной активности по текущему значению E . Прототип

системы прогноза, использующий измерения солнечного ветра с КА ACE, реализован на WWW сервере ИКИ.

7. Определены характерные пространственные масштабы корреляции интегрального потока мощности Аврорального Километрового Излучения (АКР) и вариаций геомагнитного поля на высотах 2-3 радиуса Земли. Измерения АКР проводились на спутнике АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД при помощи спектрополяриметра ПОЛЬРАД, а магнитное поле измерялось на сетях наземных магнитометров IMAGE и CANOPUS. Для определения местоположения полярных сияний использовались данные оптических измерений на спутнике POLAR. Еще в пионерских работах сотрудников НИРФИ была отмечена зависимость интенсивности АКР от геомагнитной активности, что нашло подтверждение и в последующих работах. Такая зависимость объясняется единым источником и вариаций поля, и АКР – ускорением авроральных электронов и возникающими в результате ионосферными токами. На высотах измерений АКР в пределах 10-20 тыс. км корреляция наблюдается на масштабах, которые составляют 1 – 3 тыс. км (в проекции на ионосферу). Эти масштабы зависят не только от взаимного положения сияний, магнитной станции и спутника, но и от спектральных особенностей и угловых размеров источника излучения. Это согласуется с локализацией источника АКР внутри дуги полярных сияний и позволяет сделать оценки размеров области генерации АКР.



Пример корреляции интегрального потока мощности АКР и вариациями магнитного поля (корреляционное расстояние от 1012 км). На верхнем графике - X-компонента магнитного поля, зарегистрированная на станции Кируна во время пролета спутника АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД вблизи этой станции. На нижней панели - интегральный поток мощности АКР, измеренный прибором ПОЛЬРАД.

11. На основе анализа плазменных и магнитных измерений на спутнике Интербол-1 показано, что магнитосфера в области внешнего каспа имеет открытую топологию. Геомагнитное поле этой области существенно отличается по направлению и величине от модели Цыганенко, предложена модель, объясняющая это отличие. Экспериментально обнаружены квазизахваченные ионы в области минимума геомагнитного поля. Показано,

что структура низкоширотного пограничного слоя связана с процессами в каспе.

Экспериментально подтверждено, что магнитосфера в области внешнего каспа имеет открытую топологию. Вторгающиеся в магнитосферу частицы солнечного ветра несут явные признаки прохождения через вращательный разрыв (магнитопаузу) даже в областях, лежащих южнее каспа (т.е. на силовых линиях, уходящих в хвост магнитосферы). Положение области пересоединения геомагнитных силовых линий с силовыми линиями магнитного поля солнечного ветра крайне чувствительно к направлению межпланетного магнитного поля, что приводит к сильной изменчивости потоков вторгающейся в касп плазмы солнечного ветра даже при слабых изменениях межпланетного магнитного поля. Геомагнитное поле в области каспа резко отличается по величине и направлению от поля, предсказанного наиболее распространенной моделью геомагнитного поля Цыганенко-96. Область с сильным отклонением магнитного поля от предсказанного моделью имеет вид воронки и совпадает с областью вторжений плазмы солнечного ветра в касп. Отклонение магнитного поля от модели были объяснены протеканием диамагнитных токов по границе области вторжения. Было экспериментально показано, что в области минимума геомагнитного поля в районе внешнего каспа наблюдаются квазизахваченные ионы с энергией 10 - 25 кэВ. Было показано, что по крайней мере внешняя часть пограничного слоя непосредственно связана с процессами в каспе и, в частности, с пересоединением. Таким образом, сделан существенный шаг в понимании природы пограничных слоев магнитосферы.

16. Обнаружены волновые пакеты быстрых квазигармонических колебаний потока ионов и межпланетного магнитного поля в области форшока перед

головной ударной волной Земли.

В области форшока перед околоземной ударной волной обнаружены эпизодические волновые пакеты (всплески) длительностью около 10-20 сек. быстрых квази-гармонических (с периодом около 2 сек.) колебаний потока ионов солнечного ветра и амплитуды межпланетного магнитного поля. Если для магнитного поля отдельные подобные всплески наблюдались и ранее, то для плотности плазмы они обнаружены впервые. Анализ показывает, высокую степень коррелированности колебаний плазмы и поля (коэффициент кросс-корреляции положителен и равен примерно 0.8), что свидетельствует, по-видимому, о развитии быстрой моды магнито-звуковых колебаний. Из сравнения данных спутника ИНТЕРБОЛ-1 и субспутника МАГИОН-4 получено, что эти волновые пакеты сносятся потоком солнечного ветра вниз по течению и характерное время их существования примерно равно их длительности.

17. Доказана эндогенная природа сильной низкочастотной магнитоплазменной турбулентности в переходной области.

Проведен анализ быстрых (в шкале от секунд до десятков минут) и больших (от десятков процентов до нескольких раз по отношению к среднему уровню) колебаний потока (плотности) плазмы и модуля (и компонент) магнитного поля в магнитослое. Доказано, что эти колебания не являются просто усилением флуктуаций солнечного ветра и не могут быть объяснены движением магнитослоя как целого, а в существенной своей части рождаются в магнитослое. Сопоставление наблюдений этих вариаций на спутнике Интербол-1 и данными с других космических аппаратов, одновременно проходящих через магнитослой, показывает, что они, по-видимому, представляют собой структуры сжатия/разрежения, возникающие вблизи подсолнечной ударной волны и сносимые в хвост магнитосферы течением магнитослойной плазмы.

19. Предложен новый механизм генерации продольных токов в каспе, на основе результатов наблюдений на спутниках Интербол-1 и Магион-4.

Предсказанная система продольных токов согласуется с измерениями системы токов R_0 в каспе, выполненных на низколетящих спутниках.

Предложен механизм генерации продольных токов в каспе, составляющих так называемую токовую систему R_0 , которая, в отличие от других токовых систем в этой области, не зависит от B_y -составляющей межпланетного магнитного поля. Согласно предложенной модели в северном полушарии направление продольного тока вверх в дополуночном секторе местного геомагнитного времени, и вниз в послеполуночном секторе, а в южном полушарии – наоборот. Предполагается, что продольный ток ответвляется от диамагнитного тока, протекающего на границе воронкообразной области плотной горячей солнечной плазмы во внешней области каспа.

Предложенный механизм качественно согласуется с измерениями горячей плазмы в области внешнего каспа со спутников ИНТЕРБОЛ-1 и Магион-4 и с измерениями продольных токов на уровне ионосферы с ряда околоземных спутников, в частности, со спутника Ореол-3.

20. Обнаружена область сильной электромагнитной турбулентности на границе авроральной области на ночной стороне магнитосферы во время суббури. Рассмотрены различные механизмы генерации этой турбулентности.

На спутнике АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД обнаружена область сильной электромагнитной турбулентности на полярной границе авроральной области на ночной стороне магнитосферы во время суббури. Интенсивные всплески электромагнитного поля в диапазоне частот от нескольких долей герца до локальной плазменной частоты (4-18 кГц), сильные градиенты потоков

электронов с энергиями 10 эВ-15 кэВ, приходящих из хвостовой области магнитосферы, восходящие потоки нагретых ионосферных ионов и интенсивные флуктуации продольных электрических токов являются характерными признаками этой области. Сравнение с измерениями на спутниках с орбитами на меньших высотах (ФРЕЙЯ, ФАСТ и АКЕБОНО) показывают, что область сильной электромагнитной турбулентности простирается от ионосферных высот до 2-3 радиусов Земли. Эта относительно узкая полоса (100-200 км в проекции на ионосферу) появляется во время геомагнитной суббури в ночном и утреннем секторах магнитосферы. Рассмотрены различные механизмы возникновения электромагнитной турбулентности, передающей энергию потоков электронов ионам. Одним из возможных механизмов возникновения сильной электромагнитной турбулентности на полярной границе авроральной области является токовая неустойчивость альвеновских волн. Поскольку в этой области магнитосферы плотность тепловой плазмы низка (0.1-0.5 частиц/см³) и плотности энергичных и тепловых электронов могут быть сравнимы, то инкремент токовой неустойчивости может быть достаточным для раскачки интенсивных электромагнитных волн.

28. Обнаружено, что в полярной шапке вблизи полярной границы аврорального овала иногда существует струя очень быстрой конвекции в течении получаса, проекция которой с высот спутника на ионосферные широты дает до 3 км/с.

Показано, что в зимней полярной шапке вблизи полярной границы аврорального овала иногда существует струя очень быстрой конвекции, которая несет ионосферные ионы, в том числе и ион O⁺ из каспа в ночную магнитосферу. В предположении, эквипотенциальности пересекаемых

спутником магнитных силовых линий получено, что скорость конвекции на уровне ионосферы около 3 км/с. Одновременные измерения системой локаторов SuperDARN не показывают такой высокой скорости конвекции. Возможно, это связано с сильной турбулентностью в ионосфере, сопровождающей быструю конвекцию, при которой КВ-радар не видит отраженный луч – это явление известно в ионосфере и носит название Slant E Condition (SEC). Источник измеряемых ионов определялся в предположении, что такая высокая скорость конвекции может существовать в течение получаса и более вдоль дрейфовой траектории ионов. Анализ показал, что источник находится в районе дневного каспа, в котором, как известно, происходит эффективный нагрев и ускорение ионов, особенно ионов кислорода, и их инжекция в магнитосферу в форме "ионного фонтана". При меньшей средней скорости конвекции источник ионов находится внутри полярной шапки, что не соответствует чистому полярному ветру, когда из ионосферы в магнитосферу истекают только легкие ионы H^+ и He^+ , но не ион O^+ . В данных случаях детектируются и восходящие ионы O^+ , что требует дополнительного механизма нагрева в полярной шапке.

30. Обнаружены слабые потоки высокоэнергичных электронов в области каспа. Показано, что эти потоки обусловлены эффектами высыпания из области каспа квазизахваченных частиц.

В области каспа со спутника ИНТЕРБОЛ-2 на высотах 14-18 тыс. км по измерениям прибора СКА-3 наблюдались слабые потоки электронов с энергиями более 20-40 кэВ. Они локализованы там же, где по данным спектрометра частиц ИОН наблюдаются типичные для каспа вторжения протонов с энергиями, характерными для магнитослоя – от нескольких сотен эВ до ~ 2-3 кэВ, а также электронов малых энергий. Аналогичное увеличение интенсивности электронов с энергиями 20-300 кэВ систематически

наблюдалось в области каспа на высотах 500-2000 км приборами СПЭ-1 на спутнике Интеркосмос-24 (Активный).

Как известно со спутника POLAR подтверждено предсказанное ранее В.Л.Шабанским и А.Е.Антоновой увеличение интенсивности энергичных электронов в области внешнего каспа за счет их квазизахвата в высокоширотном минимуме магнитного поля. Очевидно, что наблюдения энергичных электронов в каспе на меньших высотах со спутников Интербол-2 и Интеркосмос-24 обусловлены эффектами высыпания из области каспа квазизахваченных частиц, ускоренных на околоземной (отошедшей) ударной волне и/или непосредственно в области внешнего каспа, и потому могут служить для уточнения положения проекции внешней области квазизахвата частиц в каспе на ионосферу.

36. На основе многоспутниковых измерений показано, что разность потенциалов, возникающая поперек горловины каспа составляет величину около 50 кВ.

По измерениям в течение длительного стационарного интервала (24 ноября 1981 г.) с нескольких спутников (Ореол-3, TIROS-6, TIROS-7, DE-2) показано, что проекция на полярную ионосферу области прямого проникновения солнечной плазмы в магнитосферу (касп) имела вид полосы около 100 км по широте и около 2000 км по магнитной долготе в околорасположенном секторе. Эти размеры полосы каспа соответствуют разности потенциалов поперек "горловины каспа" около 50 кВ, что составило более половины полной разности потенциалов через полярную шапку в этот период. Таким образом показано, что существенная доля энергии вводится в магнитосферу через лобовую магнитопаузу и каспы.

40. Исследована динамика распределения концентрации тепловой плазмы внутри плазмосферы, связанной с геомагнитными возмущениями. Проанализированы результаты измерений, выполненных при помощи прибора Альфа 3 на спутниках Интербол-1,2, с целью изучения динамики распределения концентрации тепловой плазмы внутри плазмосферы, связанной с геомагнитными возмущениями. Получено, что во время интенсивных магнитных бурь изменяется не только положение плазмопаузы, но и распределение концентрации ионов в глубине плазмосферы (впервые): в начальной стадии развития возмущения концентрация уменьшается в 2-3 раза по сравнению со спокойным периодом, а позже возрастает в 4-5 раз по сравнению с достигнутым минимальным значением. Изменение концентрации в начальной фазе бури может быть объяснено процессами в подстилающей ионосфере, а рост концентрации ионов, при приближении плазмопаузы к Земле и, следовательно, при уменьшении объема плазмосферы может означать, что, по крайней мере, в некоторых случаях динамика плазмопаузы определяется не только выносом холодной плазмы из плазмосферы в магнитосферу, как общепринято в настоящее время, а и сжатием плазмосферы. Показано, что запаздывание начала движения плазмопаузы, вызванного геомагнитным возмущением, в дневном секторе магнитосферы относительно ночного сектора может быть значительно меньше времени коротации плазмы с ночной стороны на дневную.

1. Изучение процессов ускорения частиц и динамики магнитосферы Земли с помощью спектрометров с высоким разрешением ДОК-2.

В экспериментах ДОК-2 на Хвостовом и Авроральном зондах благодаря рекордно высокому энергетическому и временному разрешению аппаратуры получен ряд принципиально новых данных о популяции энергичных частиц и процессах их ускорения и распространения в магнитосфере:

- Открыто явление "Почти Моноэнергетических Ионов" на границах магнитосферы и в ее хвосте. Явление было интерпретировано, как результат ускорения ионов электростатическим полем, образующимся при разрыве токовых волокон в токовых слоях (магнитопауза, плазменный слой хвоста).
- Изучены характеристики дисперсионных структур, наблюдавшихся в спектрах энергичных ионов и электронов в Авроральной зоне. Установлено, что эти структуры образуются в результате градиентного дрейфа ионов, инжектированных из плазменного слоя хвоста магнитосферы. Анализ структур позволяет определить момент инжекции (ускорения) частиц с точностью несколько десятков секунд и найти место процесса ускорения частиц до 500-600 кэВ в цепи событий, сопровождающих развитие суббури.
- В спектрах энергичных ионов в переходной области вблизи восточного фланга магнитопаузы наблюдались характерные пики, которые были интерпретированы как результат выхода магнитосферных квазизахваченных ионов в переходную область. Энергия пиков, как выяснилось, зависит от расстояния точки наблюдения до магнитопаузы, что дало возможность предложить новый метод дистанционного зондирования магнитопаузы.

2. Квазистабильные и импульсные пучки ионов в авроральной магнитосфере.

Для механизма нагрева и ускорения плазмы в хвосте магнитосферы определяющее значение имеют процессы пересоединения межпланетного и геомагнитного полей и процессы развития крупномасштабных

неустойчивостей при реконфигурации магнитного поля в ходе развития вспышечных явлений во время суббурь. Поиски свидетельств этих процессов привели к обнаружению двух различных типов энерго-диспергированных структур ионов (VDIS и TDIS), являющиеся автографами пучков ионов и позволяющие детектировать активные области в авроральной магнитосфере. Детальные исследования по данным проекта "Интербол-2" показали:

- VDIS представляют собой одиночные, длительные (5-20 мин.), стабильные во времени пространственно диспергированные структуры ионов с энергиями 1-20 кэВ на полярном крае авроральной зоны, энергия ионов увеличивается с ростом геомагнитной широты;
- TDIS - спорадические, повторяющиеся, кратковременные (1-3 мин) временные инъекции с энергиями ионов 2-30 кэВ, наблюдаемые почти на одной широте, энергия ионов в которых зависит от времени пересечения их спутником;
- процесс образования VDIS связан с формированием и распространением пучков ускоренных ионов из области пограничного плазменного слоя (50-120 Re) при квазистационарном пересоединении в хвосте, тогда как процесс образования TDIS связан с генерацией и инъекцией пучков ионов из области более близкого плазменного слоя (8-30 Re), ускоренных на фронте неустойчивости вблизи полярного края области выпуклости аврорального овала при вспышке суббури;
- дисперсия по энергии в структурах VDIS объясняется эффектом скоростной фильтрации ионов при движении их к Земле под действием электрического дрейфа, а дисперсионная картина в TDIS связывается с времяпролетным эффектом движения ионов различных энергий из плазменного слоя до высот спутника "Интерболл-2".

3. Исследование глобальной динамики хвоста магнитосферы Земли во время магнитных суббурь.

Одной из основных проблем физики магнитосферы Земли является необходимость перехода к количественному описанию динамики ее взаимодействия с солнечным ветром, в том числе, во время магнитных суббурь. В ходе исследований характеристик более чем 100 суббурь параметры (суммарное давление плазмы и магнитного поля), позволяющие определить время начала и амплитуду глобальных изменений в геомагнитном хвосте во время суббури. Изменения давления, а также их связь с вариациями в солнечном ветре, являются общими чертами для всех классов суббурь, включая суббури на сжатом овале. Показано, что динамика и стабильность хвоста магнитосферы Земли (как неустойчивой системы, находящейся под воздействием солнечного ветра) определяются временем конвекции электрического поля солнечного ветра внутри хвоста (характерным временем системы), а не количеством аккумулированной энергии.

4. Многопутниковое исследование вариаций плазмы и магнитного поля в солнечном ветре, форшоке и магнитослое Земли в широком диапазоне масштабов.

По данным высокопробных измерений потока ионов солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в области околоземного форшока исследованы характеристики и свойства быстрых вариаций этих параметров в данной области межпланетного пространства. Анализ одновременных измерений на спутниках ИНТЕРБОЛ-1, МАГИОН-4 и GEOTAIL позволил оценить корреляционный масштаб области форшока, который является ключевым параметром в решении вопроса о модификации солнечного ветра при прохождении этой области. Другое направление исследований связано с подробным изучением свойств коротких квазигармонических структур, развивающихся синхронно как в магнитном поле, так и в плазме солнечного ветра, причем вариации данного типа в плазме наблюдались впервые. На основе корреляционного и спектрального методов анализа выявлены

характерные особенности этих вариаций, и сопутствующие их возникновению явления в плазме и магнитном поле. Доказано количественно (и для отдельных событий, и на большой статистике), что сильные вариации плазмы и магнитного поля в магнитослое в большинстве случаев имеют внутреннее происхождение, т.е. генерируются непосредственно в магнитослое (по-видимому, вблизи ударной волны) и, следовательно, могут приводить к значительным магнитосферным возмущениям даже в условиях совсем спокойной межпланетной среды. Показано, что вариации плотности плазмы представляют собой устойчивые структуры сжатия и разрежения, движущиеся вместе с потоком и проходящие без разрушения большие расстояния (10-20 R_e) вдоль магнитослоя.

5. Исследование турбулентного погранслоя (ТПС) на высокоширотной магнитопаузе

- По данным Интербола-1, Полара, Геотейла и Винда впервые установлено, что: ТПС является постоянно действующей критической областью магнитосферы, где происходит диссипация направленной энергии плазмы, аннигиляция магнитного поля и генерируются каскады нелинейных, преимущественно Альфвеновских, волн с энергией порядка кинетической энергии потока в переходной области;
- ТПС наиболее интенсивен (до 20 нТ) над каспом и над высокоширотным хвостом магнитосферы, в ТПС происходит нагрев плазмы в 1,5-3 раза в диамагнитных полостях с малым магнитным полем; малая доля ионов ускоряется до сотен кэВ, электронов - до десятков кэВ;
- Сравнение с МГД моделированием демонстрирует проникновение плазмы внутрь как непосредственно в каспе, так и в хвосте магнитосферы ; оценки диффузии и перколяции плазмы сквозь ТПС дают потоки плазмы, достаточные для наполнения каспа,

низкоширотного погранслоя и всей магнитосферы в целом солнечной плазмой;

- Флуктуации в ТПС не только модулируют локальное пересоединение антипараллельных в среднем магнитных полей, но и стимулируют вторичное пересоединение флуктуирующих полей, что является вероятным механизмом Бомовской диффузии; причем это работает параллельно с крупномасштабным пересоединением вдали от каспа, где "диффузные зоны" напоминают ТПС. Квазикогерентные структуры в ТПС обладают трансляционной симметрией характерной для критического состояния самоорганизации, например, в ближнем нейтральном слое во время суббурь;
- ТПС возмущает поток плазмы не только в застойной зоне над летним каспом, повернутым к потоку, но и вниз по течению, где плазма замедляется и нагревается примерно в 2 раза по сравнению с потоком на низких широтах.

20. Динамика области аврорального ускорения по данным эксперимента ПОЛЬРАД

Для правильной интерпретации поляризационных измерений АКР построена компьютерная модель прибора ПОЛЬРАД и определены угловые поправки при измерениях параметров Стокса.

Впервые определены динамические спектры параметров Стокса для АКР. Показано, что интенсивность излучения с левой поляризацией часто того же порядка, что и правополяризованного, а иногда и превышает его в дневной магнитосфере. В ночной магнитосфере преобладает излучение с правой поляризацией.

Обнаружены широкополосные всплески АКР (30-900 кГц) с быстрым изменением (расширением) частоты излучения. Время существования

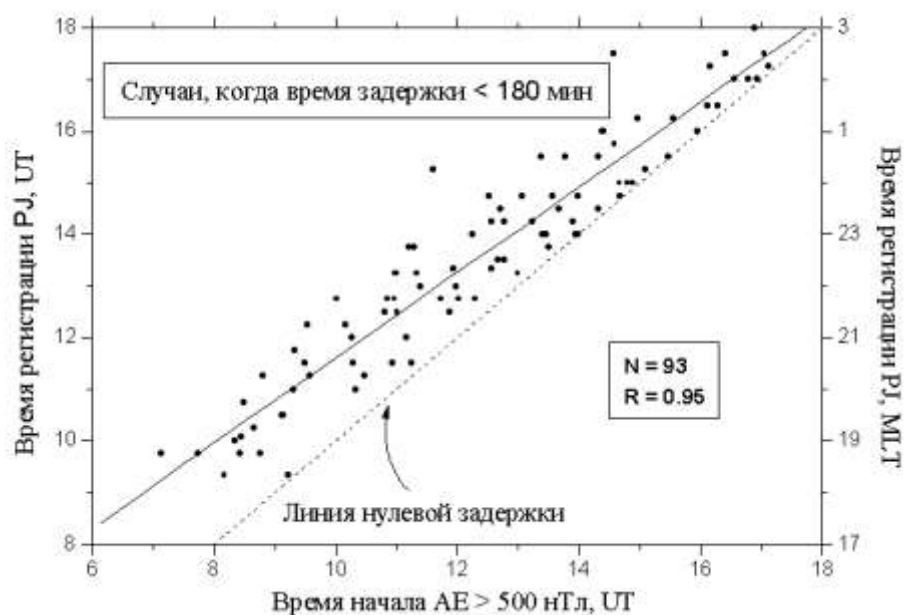
таких всплесков ограничено несколькими десятками минут. Оценена скорость расширения вдоль силовой линии источника всплеска АКР, которая может достигать Алвеновской скорости. Такие всплески наблюдаются на полярной границе полярного сияния при его интенсификации и быстром расширении в сторону полюса и связаны с нисходящими потоками энергичных электронов. Выявлена тонкая структура всплесков АКР, которая указывает на филаментарную структуру продольного тока.

3. Впервые экспериментально подтвержден физический механизм формирования поляризационного джета за счет инжекции энергичных частиц при вспышке суббури.

Ряд различных физических механизмов был предложен для формирования поляризационного джета (PJ) - узкой полосы направленного к полюсу электрического поля вдоль плазмопаузы, вызывающего сверхзвуковой дрейф и нагрев плазмы, неоднородности концентрации, слабую субавроральную красную дугу. Интерпретация осложнялась тем, что в литературе господствовало представление о формировании PJ на фазе затухания суббури, но недавно было показано (Халипов и др., 2001), что PJ формируется на фазе вспышки.

Анализ многолетних наземных измерений PJ на широтной цепочке ионосферных станций в Якутии ($3 < L < 5$; $MLT = UT + 9 \text{ h}$) позволил выявить ряд случаев одновременных измерений PJ с наземных станций и энергичных частиц со спутников АМРТЕ/ССЕ и ИНТЕРБОЛ-2. Такие одновременные измерения очень редки, т.к. требуют совпадения прохождения спутника над станцией, появления здесь PJ, и, конечно,

проведения соответствующих измерений как на спутнике, так и с Земли.



Зависимость времени появления поляризационного джета на ст. Якутск от времени начала суббури с $AE > 500$ нТ для случаев, когда длительность временной задержки между рассматриваемыми событиями не превышает 3 часов. Штриховая линия обозначает отсутствие задержки.

В результате сопоставления показано, что по крайней мере для этих случаев сильных суббурь явление PJ каждый раз сопровождалось мощной инжекцией ионов с энергиями до ~ 50 кэВ и интенсивностью $\sim 10^6$ см⁻².с.стер.кэВ. При этом вблизи области инжекции в околополуденном секторе местного времени наблюдались ионы без дисперсии в широком диапазоне энергий, а в вечернем секторе - с дисперсией в форме "носовых структур" (nose events). Поляризационный джет наблюдался около экваториальной границы проникновения энергичных ионов в магнитосферу. Скорость градиентного дрейфа ионов с энергией ~ 20 кэВ, образующих "носовую структуру", близка к скорости смещения к западу переднего фронта формирования PJ по измерениям ионозондов на различных долготах.

Таким образом, впервые экспериментально подтвержден физический механизм формирования поляризационного джета за счет инжекции

энергичных частиц при сильной вспышке суббури (Southwood and Wolf, 1978). Определено время формирования поляризационного джета $\sim 5 - 10$ минут. Следовательно, это проявление вспышки суббури и инъекции энергичных частиц на субавроральных широтах, а не фазы затухания суббури, как считалось ранее. На этой основе построена количественная модель поляризационного джета в магнитосфере и в ионосфере на его квази-стационарной стадии, которая согласуется со всеми его средними характеристиками.

5. Экспериментально обнаружена и изучена асимметрия положения околоземной ударной волны в плоскости терминатора.

По данным Магион-4 (субспутника Интербола-1) и космического аппарата Wind обнаружена асимметрия положения околоземной ударной волны в плоскости терминатора. Исследована зависимость этого эффекта от параметров солнечного ветра. Показано, что сечение околоземной ударной волны плоскостью терминатора асимметрично только при значительном различии магнитозвуковой скорости и максимальной из альвеновской и звуковой скоростей в потоке солнечного ветра (г,е). Эффект пропадает при малом различии вышеупомянутых скоростей (а,в,д) и при течении солнечного ветра вдоль межпланетного магнитного поля (а,б). Если направление межпланетного магнитного поля квазиперпендикулярно скорости солнечного ветра, то отношение осей эллипсоида сечения околоземной ударной волны может достигать $\sim 1,1$ (е). Кроме того, при типичном для околоземного солнечного ветра угле $\sim 45^\circ$ между направлением солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, эллипсоид сечения околоземной ударной волны не только вытянут в направлении перпендикулярном магнитному полю, но и на $\sim 1,5$ радиуса Земли сдвинут в "утреннем" направлении (г).

9. Событийное и статистическое изучение свойств резких и больших скачков потока ионов (плотности) солнечного ветра.

Проведен детальный анализ систематических измерений потока ионов солнечного ветра на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 за 1996-1999 гг. и выделено несколько десятков тысяч резких (менее, чем за 10 мин.) и больших возрастаний/спадов потока (плотности плазмы) и, соответственно, скачков динамического давления.

Получена оценка средней частоты таких событий (больших и резких скачков потока и давления солнечного ветра) в зависимости от их амплитуды - от 50 скачков в день с амплитудой 0.4-0.7 нПа до одного скачка раз в 5 дней с амплитудой больше 6 нПа. При этом для больших скачков средняя относительная амплитуда скачка составляет около 100%.

Показано, что около половины больших скачков потока (и давления) связаны только с изменениями плотности плазмы в отсутствие заметных изменений скорости солнечного ветра, амплитуды и направления межпланетного магнитного поля. Проведено детальное сопоставление временного хода потока ионов для больших скачков по данным 3-4 космических аппаратов (ИНТЕРБОЛ-1, WIND, IMP 8, Geotail). Показано, что примерно для 20% событий имеется заметное отличие амплитуды и времени прихода (вследствие большого наклона фронтов) возмущения к Земле по сравнению с наблюдениями на удаленном мониторе (WIND), что может быть существенным для кратковременных предсказаний Космической Погоды.

(Научный руководитель - д.ф.-м.н. Г.Н. Застенкер, 333-13-88,
gzastenk@iki.rssi.ru;

M.O. Riazantseva, P.A. Dalin, G.N. Zastenker, Statistical study of the sharp and large solar wind ion flux changes by INTERBALL-1 satellite measurements,

Proceedings of WDS'01 Conference, Part II, Physics of plasmas and ionized media, pp.233-238, 2001; P.A. Dalin, G.N. Zastenker, K.I. Paularena, J.D. Richardson, A Survey of large, steep solar wind dynamic pressure changes observed by INTERBALL-1 and IMP 8, submitted to Annales Geophysicae 2001.)

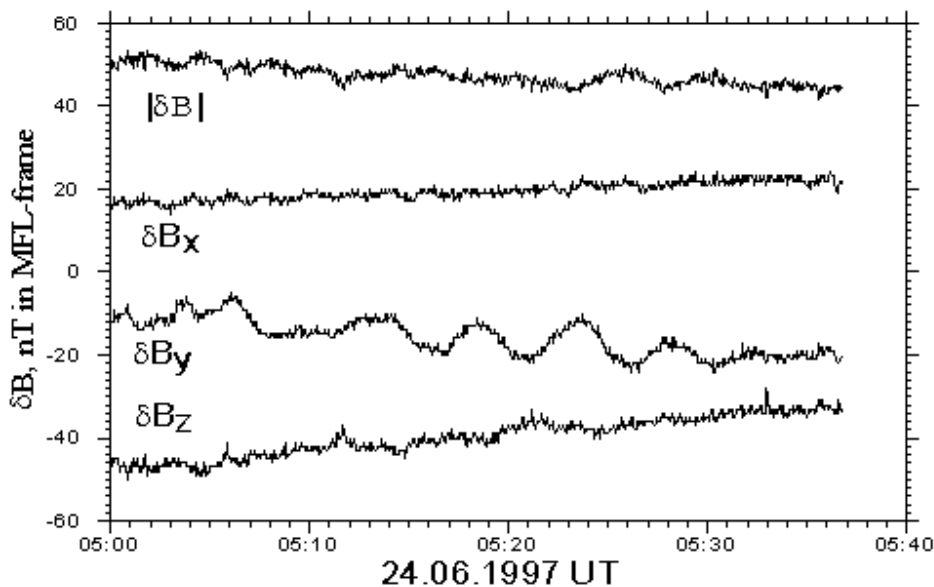
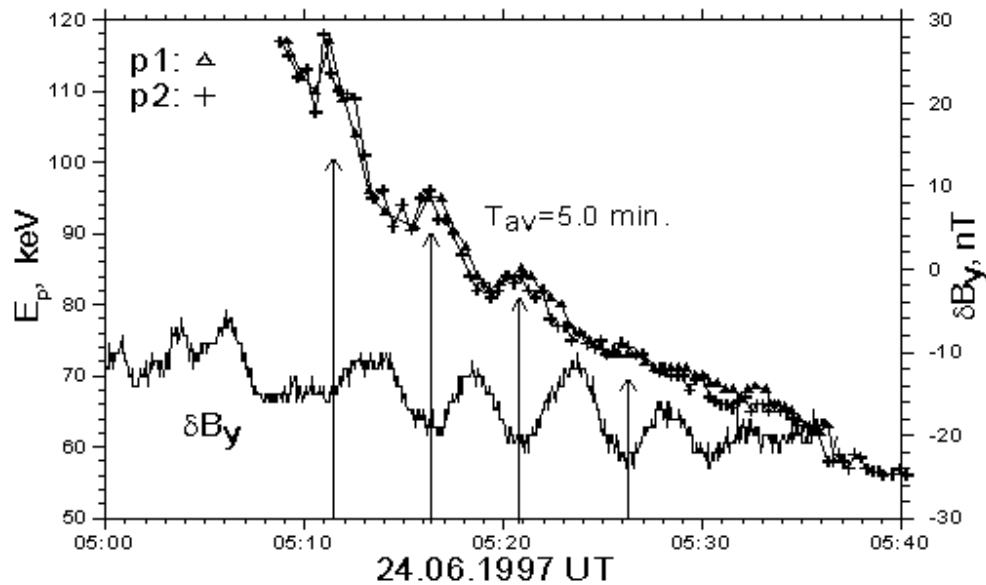
10. Турбулентный погранслои на границе геомагнитной ловушки.

По спутниковым данным проекта ИНТЕРБОЛ обнаружено новое явление: термализация потока горячей плазмы в распределенной области над полярными каспами - с "дальнодействующими" вихревыми дорожками и локальными разрывами / солитонами. Просачивание плазмы сквозь структурированную границу и вторичное пересоединение флуктуирующих магнитных полей в высокоширотном турбулентном пограничном слое (ТПС) объясняют основной приток плазмы солнечного ветра в магнитосферную ловушку. Термализация ионов, в отличие от ударной волны, сопровождается генерацией каскадов когерентных альвеновских волновых пакетов с масштабами от ионного гирорадиуса до радиуса кривизны магнитного поля, а также диамагнитных полостей с размагниченной и нагретой плазмой внутри. Эта "кипящая" плазма характеризуется областью частот со спектром, отличным от колмогоровского (с наклонами 1.2 и 2.4 вместо $5/3 - 3/2$). Обнаружена самоорганизация флуктуаций в погранслое - синхронизация трехволновых распадов на выделенных масштабах.

14. Дисперсионные структуры в спектрах ионов и электронов в авроральных областях

Высокое энергетическое и временное разрешение ДОК-2 позволило обнаружить в авроральных областях магнитосферы тонкие дисперсионные структуры в спектрах ионов и электронов и выяснить их природу. Эти структуры представляют собой узкие линии (ПШПМ до 16%) с энергией, монотонно уменьшающейся со временем. В спектрах ионов, в отличие от спектров электронов, обычно наблюдаются пары линий с отношением

энергий 1:2.



Ранее нами было показано, что дисперсионные структуры возникают в результате градиентного дрейфа частиц, импульсно инжектированных на ночной стороне магнитосферы. Ионы и электроны, дрейфуя вокруг Земли в противоположные стороны, встречаются со спутником в некоторый момент времени. В ряде случаев наблюдались частицы, совершившие несколько полных оборотов. Энергия регистрируемых частиц зависит от длины пути и скорости дрейфа, которая пропорциональна энергии на единицу заряда частицы. Пары пиков в спектрах ионов соответствуют протонам и альфа-частицам. Исследование дисперсионных структур позволяет определить момент ускорения частиц, оценить по ширине пиков длительность процесса

ускорения и получить спектры ускоренных протонов, альфа-частиц и электронов в конкретном событии. В некоторых событиях изменение энергии пиков со временем представляло собой периодические синусоидальные колебания, наложенные на нормальную, гладкую гиперболу. Периоды колебаний были 3-7 мин. Мы назвали такие дисперсионные структуры "волнистыми". Пример такого события приведен на рисунке. Как выяснилось, временные вариации энергии пика в таких событиях полностью коррелируют с вариациями локального магнитного поля (совпадение периода и фазы, см. рисунок). Колебания магнитного поля были поперечными, преимущественно в долготном направлении (восток-запад). Соотношение фаз таково, что энергия пика возрастает, когда вариация магнитного поля направлена к востоку. Дано простое объяснение этому явлению в рамках модели градиентного дрейфа ионов. Анализ "волнистых" дисперсионных структур позволил получить оценку амплитуды колебаний силовых линий по долготе.

16. Обнаружение вертикальной конвекции плазмы в хвосте магнитосферы Земли по данным проекта Интербол и установление наличия значительной конвективной компоненты направленных к Земле спорадических потоков плазмы в приэкваториальных зонах хвоста.

В рамках работы по исследованию динамики хвоста магнитосферы Земли по данным проекта Интербол и других международных программ было продолжено изучение распределения потоков горячей плазмы в плазменном слое. Направление и сила указанных потоков вещества определяют картину глобальной конвекции магнитного потока в магнитосфере Земли и, следовательно, ее энергетику.

По данным проекта Интербол была впервые экспериментально обнаружена медленная вертикальная конвекция плазмы к экваториальной плоскости, определяемая направлением межпланетного магнитного поля (ММП). В

соответствии с теоретическими представлениями, во время южного ММП, открывающего магнитосферу и наводящего в ней круговорот магнитного потока, средние скорости плазмы от границы ночной части магнитосферы к экваториальным областям составляют 7-10 км/с. Во время северного ММП конвекция прекращается. Показано, что в дополнение к такой "классической" конвекции, направленной противоположно в северных и южных долях хвоста, существует и направленная везде на север (в зенит), компонента потока плазмы примерно такой же величины (7-10 км/с). Эта составляющая, вероятно, вызывается наличием предпочтительного направления (к Земле и к северу) сокращения силовых линий магнитного поля, вытянутых и смещенных на юг относительно геомагнитного экватора в зимний сезон (время проведения наблюдений спутником Интербол-1). Такое сокращение силовых линий происходит во время спорадических всплесков потоков плазмы, направленных к Земле.

Цикл конвекции магнитосферы замыкается направленными к Земле спорадическими всплесками потоков плазмы, потенциально способными отвечать за большую часть переноса магнитного потока, при условии, что скорость потока имеет значительную компоненту, направленную к Земле и перпендикулярно к местному магнитному полю. На основе анализа более чем 1 миллиона измерений вектора скорости плазмы по данным проекта Geotail показано, что в периферийных частях плазменного слоя потоки плазмы обычно направлены вдоль местного магнитного поля, в то время как близко к центру плазменного слоя (экваториальной плоскости) потоки плазмы ориентированы к Земле перпендикулярно к магнитному полю и, следовательно, могут переносить магнитный поток. Суммарная усредненная эффективность такого переноса составляет около 50%.

22. Выявлены авроральные структуры с масштабами в проекции на ионосферу порядка 1-3 тысяч км, что соответствует масштабам порядка 3-10 земных радиусов в плазменном слое хвоста магнитосферы.

Анализ планетарных картин полярных сияний, полученных со спутников POLAR, IMAGE и ИНТЕРБОЛ-2, привел к выводу, что возникающие в активные периоды области генерации интенсивных нестационарных продольных токов могут иметь масштабы в проекции на ионосферу порядка 1-3 тысяч км, что соответствует масштабам порядка 3-10 земных радиусов в плазменном слое хвоста магнитосферы. Такие крупномасштабные структуры превышают поле зрения с наземной станции, и не были отмечены по наземным оптическим измерениям. Их обнаружение со спутников существенно дополняет физическую картину процессов генерации полярных сияний.

Формирование таких крупных структур генерации нестационарных продольных токов доступно анализу на основе МГД моделирования, и поэтому может быть предсказуемо. Однако, как следует из сравнения наземных и спутниковых данных, внутри них формируются многочисленные биркеландовские токовые петли меньших масштабов, т.е. происходит турбулизация крупномасштабных токов. При этом возникают токовые петли/альвеновские волны со значительно большими плотностями тока, но их предсказуемость невелика.

29. Обнаружена сверхтонкая структура аврорального километрового излучения

По результатам обработки измерений эксперимента ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 были выявлены мелкомасштабные структуры АКР. Эти структуры могут иметь два и более временных масштаба. Большой из них, ~ 100-150 мс, хорошо согласуется с измерениям на спутнике FAST.

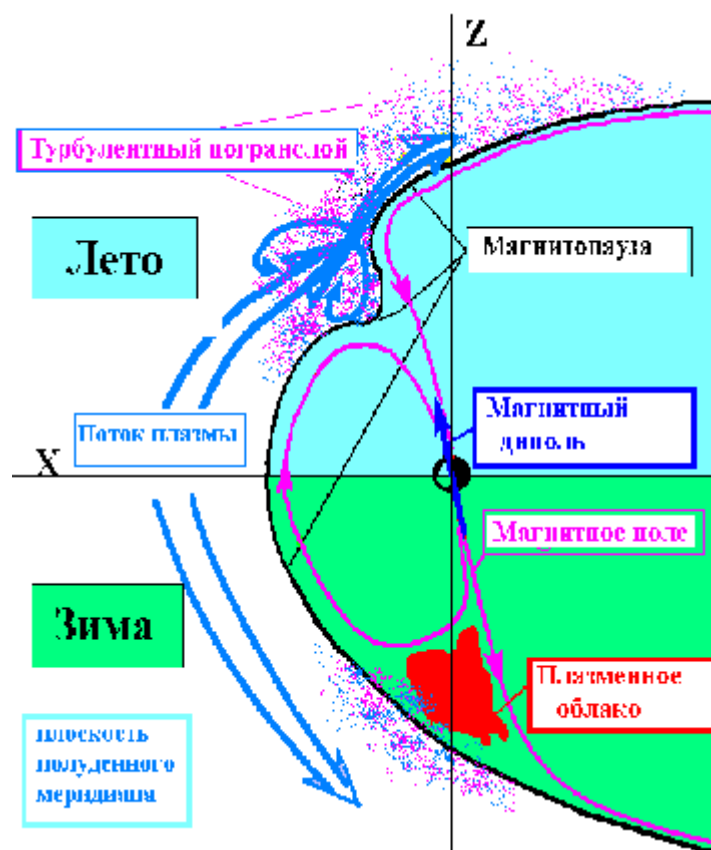
Одновременно с такими структурами часто наблюдаются более мелкомасштабные всплески с характерным временным масштабом $\sim 9-25$ мс. Дифференциальная мощность таких всплесков достигает до 10-14 Вт/м² Гц, что превышает интегральную интенсивность АКР на 1-2 порядка. Столь мелкомасштабные и интенсивные всплески трудно объяснить в рамках классического мазерного механизма. Можно предположить, что сверхтонкая структура АКР формируется ленгмюровскими солитонами. Такой механизм предложили и разработали в 70-х годах Галеев и Красносельских.

14. Обнаружены явления перемежаемости и самоорганизации сильной турбулентности над полярными каспами. Преобразование энергии потока солнечного ветра сопровождается генерацией квазирегулярных токовых слоев с аномально большими углами поворота магнитного поля.

Кинетическое моделирование показывает, что двумерные вихревые дорожки и трехмерные вихри объясняют наблюдения. Топология турбулентной зоны определяется углом наклона диполя по отношению к набегающему потоку. Данные Интербола-1 и Магиона-4, сопоставленные с данными Кластера, Поара, Геотейла, DMSP и Винда на границе магнитосферы, в ионосфере и солнечном ветре при помощи экспериментально ориентированного моделирования, позволили обнаружить самоорганизацию флуктуаций в погранслое - синхронизацию трехволновых распадов на выделенных масштабах. Получены указания, что синхронизирующие (резонансные) волновые пакеты образуются в результате обратного каскада кинетических альвеновских волн, возбуждающихся при трансформации флуктуаций набегающего потока плазмы в токовых слоях вблизи магнитопаузы над полярными каспами. Изучение статистических свойств поворота магнитного

поля в волновых пакетах в турбулентном пограничном слое (ТПС) показало наличие аномального числа больших углов поворота, что является признаком перемежаемости турбулентности в ТПС. Сравнение с кинетическим моделированием тонких (порядка гирорадиуса ионов) токовых слоев, пересекаемых виртуальными спутниками, показало, что основные черты наблюдаемых локальных возмущений могут быть объяснены нелинейной эволюцией этих токовых слоев с образованием двумерных вихревых дорожек и трехмерных вихрей. Несмотря на близкие масштабы и спектральные характеристики, топологии "застойных зон" над летним и зимним каспами отличны друг от друга. Летом (при положительном угле наклона геомагнитного диполя, т.е. к Солнцу) горловина каспа открыта для прямого взаимодействия потока плазмы переходной области с магнитопаузой, имеющей форму выступа над каспом. Причем и "застойная зона", и турбулентный погранслой на ее внутренней границе располагаются большей частью вне магнитосферы. Зимой (отрицательные углы наклона диполя) гладкая магнитопауза, расположенная почти вдвое дальше от Земли, не является жесткой преградой для развитой турбулентности, включая "диамагнитные полости". Магнитопауза становится толще и совпадает с границей обтекающего потока. Прямо под ней регулярно встречаются "плазменные шары" ('plasma balls') - полости с почти размагниченной нагретой плазмой из переходной области размером в несколько радиусов Земли. Мы считаем, что микропересоединение флуктуирующих полей и просачивание плазмы сквозь структурированную магнитопаузу наиболее эффективны для наполнения "плазменных шаров". Глобальное пересоединение, как основной источник плазмы в них, не согласуется с нашими данными. Таким образом, ТПС является постоянно действующей сложной многомасштабной нелинейной системой, а не следствием аддитивных реакций на возмущения в солнечном ветре и переходной области. Т. е. при изучении взаимодействия потока плазмы с магнитными полями необходимо учитывать коллективные эффекты, характерные для

развитой турбулентности, что может качественно изменить поведение плазменно-магнитной системы, например, привести к "катастрофической" перестройке топологии, возникновению "памяти" (зависимости от предыстории), появлению аномально больших корреляций на больших временных и пространственных масштабах и образованию квазирегулярных структур, обеспечивающих эффективное преобразование энергии и перенос плазмы. Открытие "плазменных шаров" ('plasma balls') хорошо соответствует самому названию проекта ИНТЕРБОЛ (Interball), которое восходит к "огненным шарам" Фэрфилда ('Fireballs').



Границы магнитосферы в плоскости полуденного меридиана (в Геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат):- лето в северном полушарии (верхняя полуплоскость, положительный угол наклона геомагнитного диполя - к Солнцу), - зима в южном полушарии (нижняя полуплоскость, отрицательный наклон диполя)

***) 1. Исследование вариаций плазмы и поля в магнитослое:**

По данным спутника ИНТЕРБОЛ-1 был проведен детальный статистический анализ амплитуд абсолютных и относительных низкочастотных и высокочастотных вариаций потоков ионов и модуля магнитного поля в магнитослое.

Как на отдельных ярких примерах, так и на большой статистике было показано, что

а) амплитуда и низкочастотных, и высокочастотных вариаций плотности плазмы и модуля магнитного поля существенно зависит от направления межпланетного магнитного поля по отношению к околоземной ударной волне;

б) амплитуда вариаций и плазмы, и магнитного поля в магнитослое значительно возрастает за квазипараллельной ударной волной;

в) вариации плазмы и поля в магнитослое не являются результатом прохождения в магнитослой вариаций в форшоке, ибо эти два явления отличаются и по физической природе (разные типы волн) и по наклону частотных спектров.

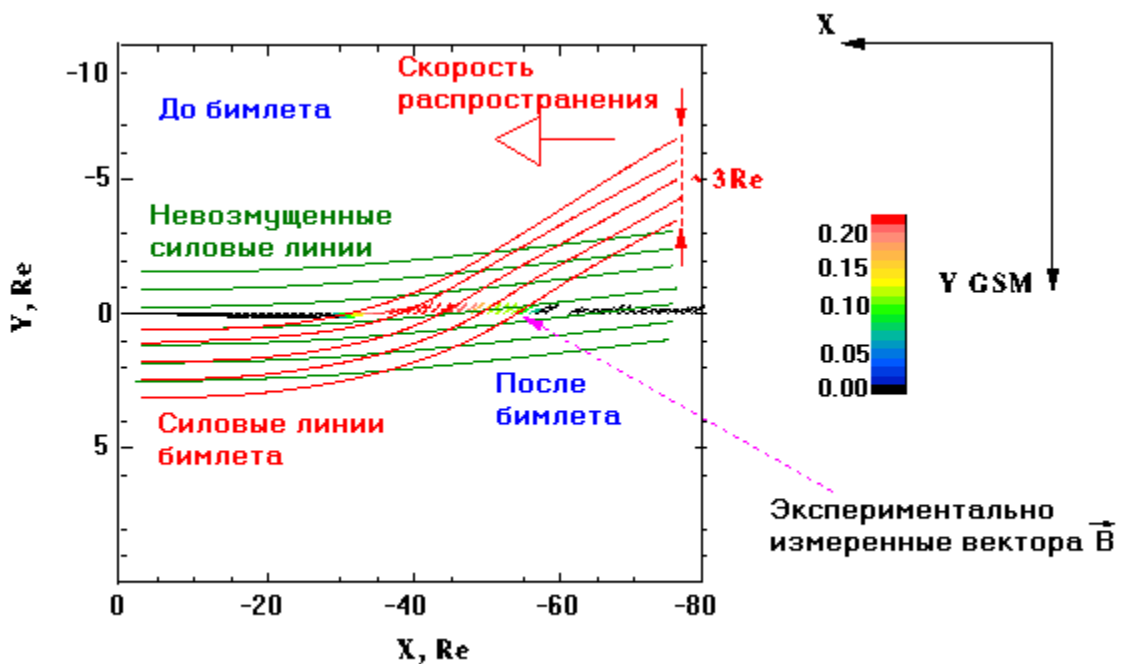
13. Исследование коротких высокоскоростных (10-30кэВ) пучков ионов – бимлетов – в хвосте магнитосферы.

1. Исследовалась связь между частотой наблюдения бимлетов (короткие высокоскоростные (10-30кэВ) пучки ионов) в хвосте магнитосферы и направлением межпланетного магнитного поля (ММП), усредненным за разные промежутки времени, предшествующие появлению бимлета. Удалось установить, что зависимость между частотой наблюдения бимлетов и направлением ММП начинает четко проявляться при усреднении данных ММП не менее чем за 1 час до наблюдения бимлета и сохраняется при

периодах усреднения достигающих 2-х часов. Это может объясняться тем, что магнитосфера не успевает достаточно быстро среагировать на изменившиеся внешние условия – должно пройти определенное время с момента установления направления ММП, необходимого для реализации в хвосте ускорительных процессов, ответственных за формирование бимлетов. Кроме того, показано, что для разных секторов хвоста (полуночного, утреннего и вечернего) зависимость частоты появления бимлетов от направления ММП выглядит по-разному. А именно, для полуночного сектора максимальная частота появления бимлетов наблюдается в интервалы, когда ММП направлено строго на юг или на север (поле практически точно направлено вдоль (или против) оси Z). В вечернем секторе бимлеты чаще всего наблюдались, когда ММП имело заметный V_y компонент. И, наконец, в утреннем секторе максимальная частота появления бимлетов была зарегистрирована, когда ММП имело строго азимутальное направление (V_y компонент был доминирующим). По-видимому, для возникновения условий генерации бимлетов на утреннем и вечернем флангах хвоста, существенную роль играет V_y компонент ММП, в то время как для ускорения в полуночном секторе, его наличие не столь важно.

2. Обнаружено, что в момент прохождения бимлетом пограничной области плазменного слоя (ПОПС) наблюдается ускорение низкоэнергичной плазмы, которой заполнены высокоширотные области магнитосферного хвоста, причем ионы этой плазмы приобретают скорость направленную перпендикулярно магнитному полю, преимущественно вдоль Y . Проанализировав 30 случаев наблюдений бимлетов спутниками Cluster (данные за 2001г.), обнаружено, что в момент прохождения бимлета наблюдается вариация магнитного поля и одновременно с этим ускорение низкоэнергичной плазмы, которая постоянно присутствует в высокоширотных частях хвоста. Причем, ионы этой плазмы приобретают скорость, направленную поперек магнитного поля (вдоль Y). Одним из

возможных объяснений этого явления может быть следующее: в момент генерации бимлета происходит искривление силовой линии (вдоль которой движется бимлет). Это искривление в плоскости XU имеет форму “колена” и распространяется с альвеновской скоростью к Земле. Такая магнитная конфигурация обуславливает ускорение окружающей плазмы в направлении U .



Схематическое изображение возмущения магнитного поля в форме “колена” в плоскости XU (красные линии), которое распространяется вместе с бимлетом в ПОПС вдоль силовых линий невозмущенного магнитного поля (зеленые линии). Цветными черточками изображены экспериментально измеренные вектора магнитного поля в проекции на плоскость XU , цвет черточек показывает плотность частиц высоких энергий (указывает начало и конец бимлета).

15. Высыпания частиц всплещного характера в высокоширотной магнитосфере

Обнаружены вспышки потоков электронов с энергиями до ~ 1.0 кэВ и протонов с энергиями до ~ 10.0 кэВ в области силовых линий, проецирующихся в полярную шапку. Проведен анализ по данным эксперимента ИОН на спутнике “Интербол-2” с сопоставлением их с наземными наблюдениями вариаций геомагнитного поля, данными УФ-имажера со спутника POLAR, данными по солнечному ветру и магнитному полю со спутника WIND. Вспышки частиц наблюдаются при небольших локальных возмущениях геомагнитного поля до ~ 50 нТ с временным масштабом 5-10 мин в спокойные периоды и в конце фазы восстановления суббурь. Наблюдения показали, что вспышки появляются преимущественно в послеполуденном и утреннем секторах MLT. Образование вспышечных популяций плазмы на фоне незаполненной частицами полярной шапки может быть связано с появлением ускоренных сгустков плазмы в хвосте магнитосферы. Одним из возможных механизмов ускорения частиц в таких вспышках может быть наличие локальных пересоединений в дальнем хвосте. Однако, проблема происхождения обнаруженных вспышек ускоренной плазмы требует дальнейшего теоретического анализа.

