

«Утверждаю»

Академик-секретарь ОФН РАН

_____ **Академик В.А. Матвеев**

« ____ » _____ 2012 г.

Отчет за 2011г.

Программа фундаментальных исследований

Отделения физических наук РАН

«Плазменные процессы в солнечной системе»

(название программы)

**Координатор программы
академик РАН**

_____ **Л.М. Зеленый**

Содержание

Введение	3
Основные научные результаты	4
1. Физические процессы во внешних областях Солнца	5
2. Физические процессы в гелиосфере	41
3. Динамика магнитосфер Земли и планет	66
4. Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы	89
5. Лабораторное моделирование плазменных процессов	109
6. Применение методов нелинейной физики для исследования физических явлений в гелиосфере	128
Заключение	143
Приложение 1	144
Приложение 2	145
Приложение 3	146

ВВЕДЕНИЕ

Программа Отделения Физических Наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе» (ОФН- VI.15) объединяет ученых из 10 институтов Отделения физических наук РАН, 2-х институтов Сибирского Отделения РАН (ИСЗФ и ИЛМ), а также ученых МГУ (НИИЯФ), СПбГУ (НИИФ) и Национальной академии наук Украины (ИКИ НАНУ/НКАУ). Финансирование работ по программе институтов Сибирского отделения проводилось СО РАН из средств СО РАН, а работы в ряде академических (ИДГ и ИЯИ РАН) и неакадемических организаций финансировались из собственных средств. Координация работ осуществлялась Советом Программы, который был составлен как из представителей институтов ОФН РАН, так и других научных организаций России и Украины.

Предметом исследования Программы "Плазменные процессы в Солнечной системе" являются разнообразные по временным и пространственным масштабам объекты: корона Солнца, солнечный ветер, плазменные оболочки Земли и других планет. Все эти объекты логически связаны иерархией физических процессов, описывающих передачу кинетической и электромагнитной энергии от Солнца к Земле, к планетам солнечной системы и границам гелиосферы. Программа сформирована из 6 направлений, которые включают в себя более 40 проектов (см. сайт Программы <http://plasma2012.cosmos.ru/>), посвященных исследованию различных аспектов общей задачи.

1. Физические процессы во внешних областях Солнца, руководители А.В. Степанов, В.М. Богод
2. Физические процессы в гелиосфере, руководитель Ю.И. Ермолаев
3. Динамика магнитосфер Земли и планет, руководитель А.Г. Демехов
4. Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы, руководитель М.Г. Деминов
5. Лабораторное моделирование плазменных процессов, руководитель А.Г. Франк
6. Применение методов нелинейной физики для исследования физических явлений в гелиосфере, руководитель Л.М. Зеленый

При проведении работ большое внимание уделялось координации исследований, выполняющихся в различных научных организациях, как в России, так и за рубежом. Около 20% результатов было получено и опубликовано сотрудниками нескольких организаций. К исследованиям активно привлекалась молодежь: студенты, аспиранты и молодые научные сотрудники.

Поставленные на 2009-2011 годы задачи исследований полностью выполнены и получены важные результаты мирового уровня. Полученные результаты опубликованы в 306 работах в рецензируемых журналах, находятся в печати – более 40 работ, сделано более 400 докладов на отечественных и международных конференциях. Под эгидой Программы проводились ежегодные конференции "Физика плазмы в солнечной системе" (см. сайт конференции <http://plasma2012.cosmos.ru/>). Полученные важнейшие результаты кратко представлены в следующем разделе.

Результаты работы по программе ОФН- VI.15 показали эффективность и результативность решения Президиума РАН об организации работ по программам отделений. На успех Программы, подтверждающий лидирующую роль РАН в проведении фундаментальных исследований по тематике ОФН- VI.15, указывают большой интерес неакадемических организаций к участию в Программе и высокое цитирование результатов в различных международных изданиях. Совет Программы, равно как и все участники проектов, считают целесообразным в каком-нибудь виде продолжить в будущем Программу Отделения физических наук «Плазменные процессы в солнечной системе».

Основные научные результаты

В 2011 году был использован опыт предыдущего цикла (2006-2008) для координации работ исследователей из различных институтов, и, даже, достаточно отдаленных регионов. Многие результаты получены совместно специалистами различных организаций. Поэтому результаты сгруппированы в соответствии с научной программой исследований.

1. Физические процессы во внешних областях Солнца

1.1. Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции (ИКИ)

Исследовалась связь между моментами инжекции солнечных протонов ~ 100 МэВ в гелиосферу и температурой вспышечной плазмы в девяти событиях 23-го цикла. Моменты инжекции оценивались по времени прихода первых протонов до наблюдателя в плоскости эклиптики по данным антисовпадательной защиты спектрометра на ИНТЕГРАЛе (ACS SPI) и протонного канала 84-200 МэВ (GOES), а температура - по отношению интенсивностей рентгеновского излучения в двух энергетических каналах GOES. Выбор нулевого момента времени с учетом подобия временных профилей температуры в различных событиях приводит к организации временных профилей как жесткого рентгеновского и гамма излучения, так и интенсивности солнечных протонов на орбите Земли. Это свидетельствует о характерной перестройке конфигурации магнитного поля в конце импульсной фазы, приводящей к изменению режима нагрева плазмы и способствующей выходу СКЛ в гелиосферу.

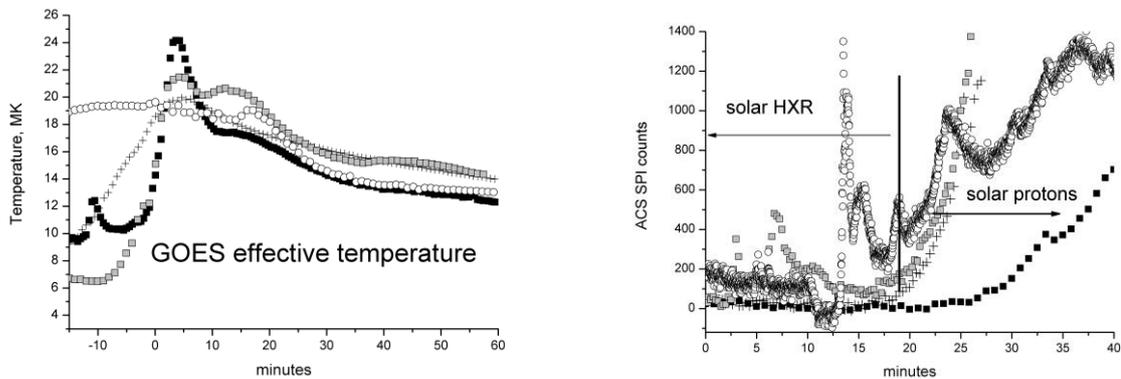


Рис. 1. Температура вспышечной плазмы и темп счета детектора ACS SPI в событиях 26 октября 2003 (кресты); 17 января 2005 (открытые кружки); 13 и 14 (открытые и черные квадраты) декабря 2006.

Струминский А.Б., Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции, Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, №6, с. 818.

Отв.: А.Б. Струминский, к.ф.-м.н., т. 333-14-67, astrum@iki.rssi.ru

1.2. Гигантские события 23-го цикла: свойства и различия (ИКИ)

Рассматривались гигантские рентгеновские события ($>X17$) 23-го солнечного цикла (28 октября и 4 ноября 2003; 7 сентября 2005), чье жесткое рентгеновское излучение полностью наблюдалось с борта КА ИНТЕГРАЛ (ACS SPI >150 кэВ), но лишь частично КА RHESSI. Эти события сравниваются с двумя наибольшими событиями,

наблюдавшимися полностью КА RHESSI (X8.3, 2 ноября 2003 и X7.1 20 января 2005). Временные профили эффективной температуры вспышечной плазмы, вычисленной по данным SXR GOES, в этих пяти событиях имеют сходную структуру, что позволило выбрать нулевой момент времени в каждом событии и сравнивать динамику их развития. Интенсивности НХР и микроволнового излучения были выше фоновых значений более часа. Нетепловое излучение началось примерно за 10 мин до нулевого времени в предвспышечной фазе. Активная импульсная фаза длилась около 20 мин и состояла из нескольких пиков НХР излучения (ACS SPI), которые превышали фон на четыре порядка, и свидетельствовала о нескольких эпизодах ускорения электронов и нагрева плазмы с различной эффективностью. Показано, что предельные интенсивности SXR излучения гигантских вспышек были результатом изменения концентрации тепловых электронов, а, следовательно, меры эмиссии. При этом вариации интенсивности электронов, генерирующих НХР излучение с энергией >100 кэВ, играли незначительную роль. Наблюдения π^0 распада и времени прихода релятивистских протонов на Землю свидетельствует о достижении ускоренными протонами релятивистских энергий после 4 мин.

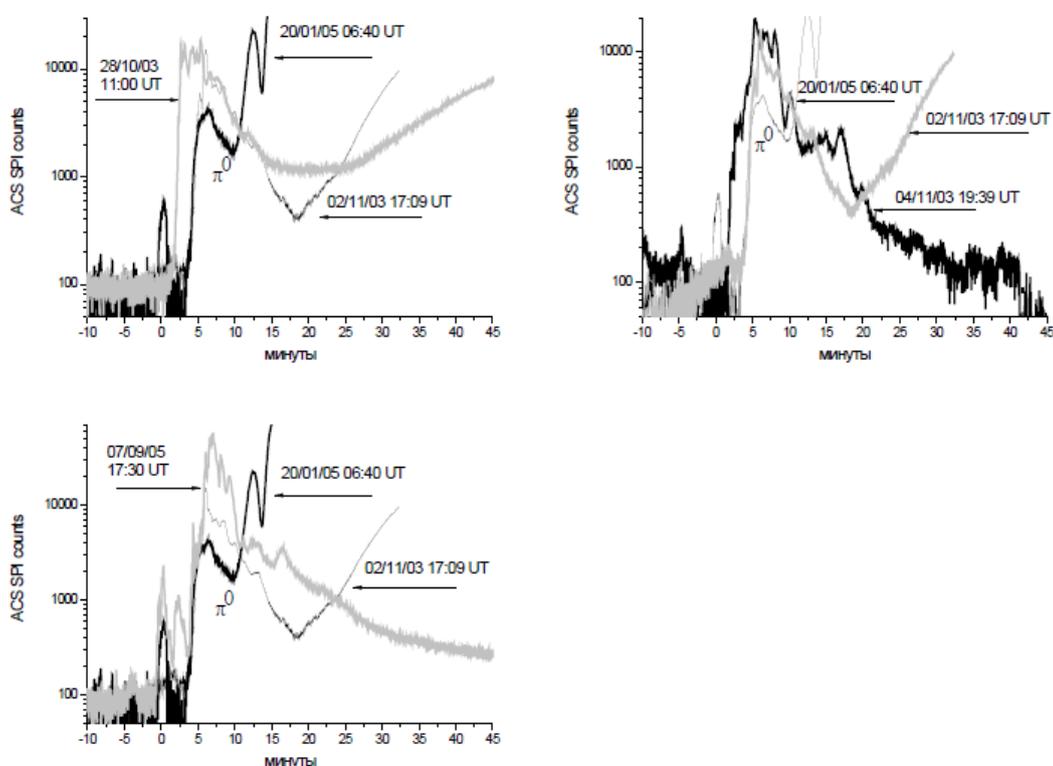


Рис. 2. Темп счета ACS SPI, показано время ожидаемого или наблюдавшегося π^0 распада.

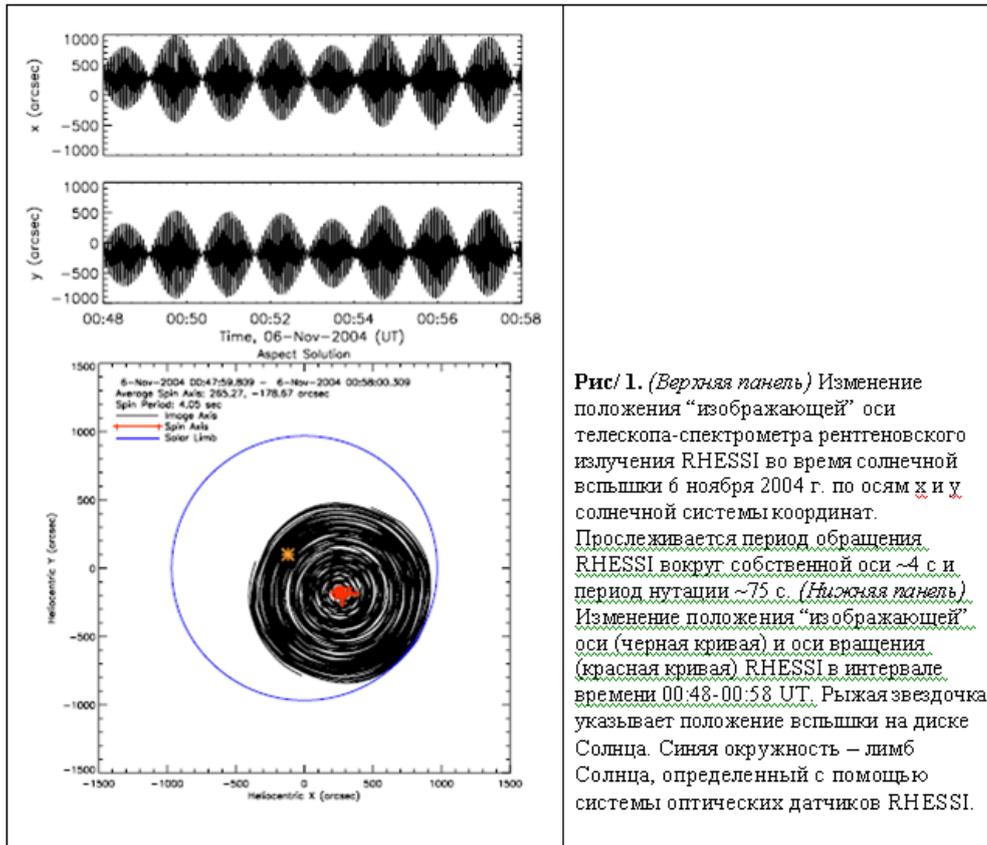
Струминский А.Б. Гигантские события 23-го цикла: сходства и различия // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца, солнечная и солнечно-земная физика-2011 /Под ред. А.В. Степанова и Ю.А. Наговицина, СПб, ГАО РАН, 2011 (в печати).

Отв.: А.Б. Струминский, к.ф.-м.н., т. 333-14-67, astrum@iki.rssi.ru

1.3. Медленные магнитозвуковые волны в двухленточных вспышках (ИКИ)

Известно, что в некоторых двухленточных солнечных вспышках триггерное возмущение, инициирующее процесс энерговыделения, распространяется преимущественно вдоль оси аркады магнитных петель со скоростью всего несколько десятков км/ч, что значительно ниже характерных альфвеновской и звуковой скоростей. Показано, что подобное триггерное возмущение может интерпретироваться как медленные магнитозвуковые волны (ММВ). ММВ могут эффективно распространяться поперек силовых линий

магнитного поля – вдоль оси аркады и линии инверсии магнитного поля – посредством эффекта волновода за счет отражения в подножиях петель аркады. Перпендикулярный магнитному полю компонент групповой скорости ММВ составляет десятые доли звуковой скорости, что соответствует наблюдениям. Максимальное значение групповой скорости ММВ увеличивается с ростом отношения звуковой и альфвеновской скоростей. Для широкого диапазона параметров задачи, соответствующих реальным физическим условиям во вспышечных областях, максимальное значение групповой скорости ММВ соответствует распространению под углами 25-28 градусов к магнитному полю. Показано, что рассмотренный механизм распространения ММВ может быть применим для объяснения квазипериодических пульсаций жесткого электромагнитного излучения двухленточных вспышек.



Рис/ 1. (Верхняя панель) Изменение положения “изображающей” оси телескопа-спектрометра рентгеновского излучения RHESSI во время солнечной вспышки 6 ноября 2004 г. по осям x и y солнечной системы координат. Прослеживается период обращения RHESSI вокруг собственной оси ~ 4 с и период нутации ~ 75 с. (Нижняя панель) Изменение положения “изображающей” оси (черная кривая) и оси вращения (красная кривая) RHESSI в интервале времени 00:48-00:58 UT. Рыжая звездочка указывает положение вспышки на диске Солнца. Синяя окружность – лимб Солнца, определенный с помощью системы оптических датчиков RHESSI.

Nakariakov, V.M. & Zimovets, I.V. *Slow Magnetoacoustic Waves in Two-ribbon Flares* // The Astrophysical Journal Letters, Volume 730, Issue 2, article id. L27 (2011).

Отв.: И.В. Зимовец, к.ф.-м.н., т. 333-14-67, ivanzim@iki.rssi.ru

1.4. Приборные осцилляции темпов счета телескопа-спектрометра рентгеновского излучения RHESSI во время солнечных вспышек (ИКИ)

Многие солнечные вспышки сопровождаются квазипериодическими пульсациями (КПП) рентгеновского излучения, механизмы генерации которых до сих пор не известны. Единственным на сегодняшний день функционирующим инструментом, позволяющим изучать солнечные источники жесткого рентгеновского излучения с пространственным разрешением (до $2.3''$), является космический телескоп-спектрометр RHESSI. В рамках данной работы:

1. обнаружены не принимаемые ранее в расчет приборные осцилляции в данных RHESSI;

2. установлена причина этих осцилляций – модуляция потока детектируемого рентгеновского излучения за счет нутации космического аппарата RHESSI;
3. разработана методика избавления от этих приборных осцилляций для надежного изучения реальных вспышечных КПП с помощью RHESSI.

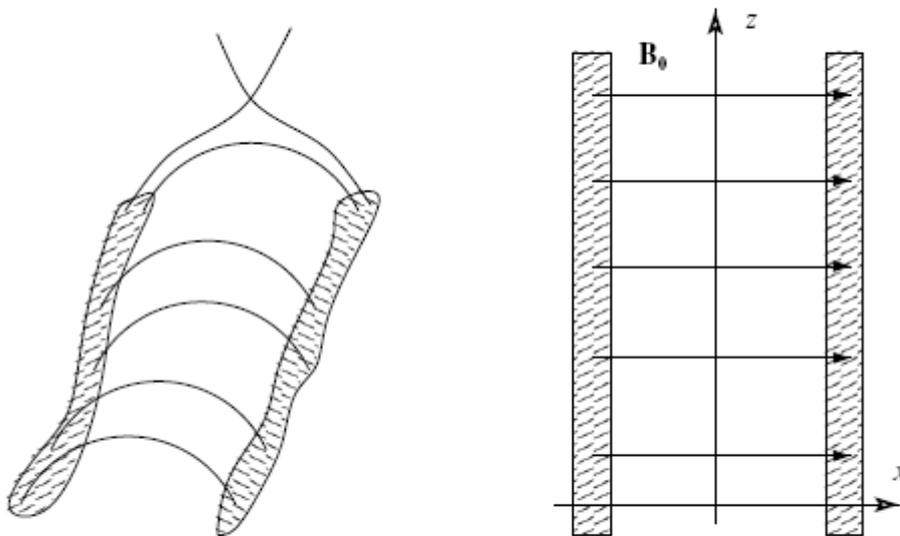


Figure 1. Magnetic arcade of a two-ribbon flare (on the left) and its model (on the right). The thick lines show the magnetic field lines. The hatched regions show the flare ribbons.

A.R. Inglis, I.V. Zimovets, B.R. Dennis, E.P. Kontar, V.M. Nakariakov, A.B. Struminsky, and A.K. Tolbert
Instrumental oscillations in RHESSI count rates during solar flares // *Astronomy & Astrophysics*, 530, A47 (2011).

Отв.: И.В. Зимовец, к.ф.-м.н., т. 333-14-67, ivanzim@iki.rssi.ru

1.5. Предложен сценарий развития солнечной вспышки на основе взаимосвязи слабых и мощных солнечных событий (ИКИ)

Предложен сценарий развития солнечной вспышки на основе суперпозиции элементарных актов энерговыделения в слабых и мощных солнечных событиях. Данный сценарий развития вспышки предложен как интерпретация экспериментальных данных, полученных со спутников ИНТЕРБОЛ, GOES, RHESSI. Были исследованы слабые солнечные события с мощностью потока рентгеновского излучения не более 10^{-8} Вт/м² и общим энерговыделением 1025 эрг, описаны их характеристики. Предложен механизм возникновения таких событий. Были исследованы также крупные вспышки класса X. Обнаружены дискретные минутные импульсы в жесткой компоненте рентгеновского излучения вспышек класса X. Выдвинута гипотеза единого вспышечного механизма на основе взаимосвязи мощных и слабых солнечных событий.

Мирзоева И.К., “Сценарий развития солнечной вспышки на основе взаимосвязи слабых и мощных солнечных событий”, Сборник “Солнечно-земная физика”, СО РАН, т.19, с.10-17, 2011 г.

Отв.: Мирзоева И.К., к.ф.-м.н., colombo2006@mail.ru

1.6. Обобщенная ретроспективная работа по малым солнечным событиям. Исследование солнечных событий по данным проектов INTERBALL, GOES, RHESSI (ИКИ)

1. По данным, полученным в проекте “Интербол-Хвостовой зонд” был выделен и обработан ряд периодов (приведены данные в основном за 1995 год), в которых наблюдались солнечные события очень малой мощности в рентгеновском диапазоне излучения Солнца. В области энергий от 2 до 15 кэВ выделен класс солнечных событий (класс 0) с общим энерговыделением от 1025 до 1026 эрг со следующими характеристиками:

- длительность: 30 ч 300с;

- мощность всплеска: $4.5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-8}$ Вт/м²;

- превышение максимальной интенсивности всплеска над тепловым фоном: 1 ч 5 имп/с;

- значение теплового фона: 6 ч 10 имп/с.

2. Обнаружено существование нижнего предела в распределении слабых солнечных вспышек по энергиям, при этом, процессы, происходящие в микровспышках, лежащих близ данного предела имеют смешанный характер, т.е. являются комбинацией теплового и тормозного рентгеновского излучения. Получены кривые распределения числа микровспышек в зависимости от их мощности.

3. Выявлено смещение максимума энергетического спектра слабых рентгеновских всплесков в более жесткую область исследуемого диапазона при переходе от минимума цикла солнечной активности к его максимуму.

4. Определено значение теплового фона рентгеновского излучения Солнца в области малых энергий на различных участках цикла солнечной активности. Выявлена взаимная связь числа слабых всплесков в рентгеновском диапазоне и разброса значений теплового фона.

5. Выявлена корреляция среднесуточных значений максимумов потоков рентгеновских всплесков микровспышек разных классов с величинами среднесуточных значений теплового фона – рентгеновского излучения солнечной короны, что позволяет сделать вывод о существенном вкладе энерговыделения микровспышек в процесс нагрева солнечной короны. Однако, в связи с малым числом микровспышек, их энерговыделения не достаточно для поддержания постоянного нагрева по всему объему солнечной короны

Мирзоева И.К., “Микровспышки в рентгеновском диапазоне излучения Солнца”, международный издательский дом LAP (LAMBERT Academic Publishing), 2011 г.

Отв.: Мирзоева И.К., к.ф.-м.н., colombo2006@mail.ru

1.7. Диагностика ускорительных процессов в солнечных вспышках и природа нагрева короны (ГАО, Рук: д.ф.-м.н. А.В.Степанов)

1.7.1. Поток энергии альвеновских волн в слабо ионизированной плазме и нагрев солнечной короны

В настоящее время считается, что альвеновским волнам может принадлежать важная роль во многих астрофизических явлениях, прежде всего, таких как нагрев корон Солнца и звезд, ускорение солнечного и звездного ветров. Однако область их генерации до сих пор не известна, т.е. волны могут возбуждаться и в конвективной зоне, и в фотосфере, и в хромосфере. Поэтому любые наблюдательные и теоретические указания, позволяющие решить эту проблему, представляют большой интерес. Вранжес и др. (A&A, 2008, 278, 553) на основе уравнений трехжидкостной магнитной гидродинамики (МГД) пришли к заключению, что если генерация альвеновских мод происходит в фотосфере, то потоки энергии волн F должны быть на несколько порядков меньше тех значений, которые следуют из общепринятого соотношения для $F = v_A \rho \delta v^2 / 2$, где ρ — плотность плазмы, δv_A — амплитуда возмущения поперечной компоненты скорости, v_A — альвеновская скорость. Это объясняется низкой степенью ионизации фотосферного вещества ($\sim 10^{-4}$). В

результате момент количества движений ионов слишком мал, чтобы «разогнать» посредством столкновений гораздо более многочисленные нейтралы. Между тем результаты, полученные в работе Вранжеса и др., на наш взгляд, нельзя считать корректными по следующим причинам. Вранжес и др. для определения значений возмущенных скоростей ионов и атомов пренебрегли в уравнениях трехжидкостной МГД электромагнитными силами. Кроме того, сама постановка задачи выглядит малоубедительной, поскольку она предполагает, что электромагнитные силы определяют движение заряженных частиц только в начальный момент времени. В силу выше сказанного проблема потоков энергии альвеновских волн в слабо ионизированной плазме требует привлечение более обстоятельного и аргументированного анализа.

В рамках трехжидкостного приближения нами исследовано влияние нейтральной компоненты космической плазмы на поток альвеновских волн в условиях атмосфер Солнца и звезд. Мы показали, что поток энергии альвеновских волн при их частоте меньшей частоты столкновений атомов с ионами не зависит от степени ионизации плазмы. Следовательно, вывод Вранжеса и др. о неэффективности генерации альвеновских волн конвективными движениями плазмы в области температурного минимума нельзя считать обоснованным. Особо подчеркнем, что именно частота столкновений атома с ионами, а не иона с атомами, как можно показаться не первый взгляд, определяет применимость уравнений идеальной МГД для описания рассматриваемых мод в слабо ионизированной плазме. На наш взгляд, генерация альвеновских волн, вероятнее всего, происходит в фотосфере. С одной стороны, это объясняется ослаблением турбулентных движений плазмы в данной области, что приводит к формированию упорядоченных магнитных структур в виде тонких трубок, выступающих в роли волноводов. С другой — конвекция здесь все еще остается достаточно развитой и обладает большой кинетической энергией, часть которой идет на генерацию различных МГД мод. В связи с этим необходимо отметить, что в тонких магнитных трубках возбуждаются не только крутильные, но и поперечные волны. Последние также можно отнести к волнам альвеновского типа, поскольку они практически не сжимают плазму. При этом подъемы и опускания вещества вдоль расширяющихся магнитных трубок под действием силы Кориолиса приводят к возбуждению крутильных мод, тогда как за генерацию изгибных волн скорее ответственны «столкновения» трубок с окружающими их гранулами. Отметим, что полученные нами результаты по сути сводятся к еще одному свидетельству применимости уравнений идеальной МГД для описания сравнительно медленных динамических процессов в фотосфере Солнца. Поскольку в их основе лежит представление о «вмороженности» магнитного поля в плазму. Тем самым нами были получены дополнительные аргументы в пользу этого основополагающего принципа плазменной астрофизики.

Tsap Yu.T., Stepanov A.V., Kopylova Yu.G., “Energy Flux of Alfvén Waves in Weakly Ionized Plasma and Coronal Heating of the Sun”, *Solar Physics*, **2011**, **270**, **1**, 205-211.

Isaeva, E. A.; Tsap, Yu. T.: The origin of solar energetic particles and type II meter radio bursts *Известия 2.КрАО т.107*, 118-125 (2011) [*Bull.CrAO* **107**, 78-83 (2011)].

1.7.2. «Амбиполярная диффузия» и магнитное пересоединение

В рамках трехжидкостного приближения рассмотрено влияние нейтральной компоненты плазмы на джоулеву диссипацию электрических токов и магнитное пересоединение Свита–Паркера. Было показано, что вследствие столкновений разогнанных силой Ампера ионов с атомами электрическая проводимость в условиях хромосфер Солнца и звезд может уменьшиться на порядки, что приводит к значительному увеличению скорости аннигиляции магнитных силовых линий. При этом толщина токовых слоев, которая без

учета движения ионов сквозь нейтральный газ в лучшем случае не превышающая десятков метров, может достигать сотни километров.

Омический нагрев частично ионизованной плазмы определяется не только электронными столкновениями, но и взаимодействием ионов с нейтральными атомами. Это предполагает возможность значительного роста скорости пересоединения магнитных силовых линий в результате уменьшения электрической проводимости и, соответственно, увеличения теплового энерговыделения вследствие джоулевой диссипации электрических токов. Между тем, по мнению Vishniac и Lazarian (Astrophys.J., 1999, 511, 193), исходивших из представлений об «амбиполярной диффузии», процесс пересоединения происходит только в области токового слоя, где доминирует электронная проводимость. А согласно Паркеру (Parker, Astrophys. and Space Sci., 8, 177), тепловая мощность, выделяющаяся посредством электрической проводимости, того же порядка, что и в отсутствие «амбиполярной диффузии». Подобные утверждения нам представляется недостаточно корректными, поскольку «амбиполярная диффузия» и проводимость Каулинга явления одной природы. Формальная разница состоит лишь в способе описания соответствующих физических процессов. Особое внимание уделено проблеме сохранения магнитного потока в случае «амбиполярной диффузии». Из полученных нами результатов следует, что имеющиеся модельные представления о выносе магнитного поля вместе с ионизированной компонентой плазмы из сжимающегося под действием силы гравитации межзвездного облака, не совсем обоснованы. В действительности, скорее имеет место диссипация магнитного поля, вызванная столкновениями двигающихся под действием силы Ампера ионов с нейтралами. При этом отметим, что условие «вмороженности» магнитных силовых линий в плазму можно считать выполненным лишь в том случае, если «амбиполярной диффузией» можно пренебречь. Учет проводимости Каулинга и динамического охлаждения плазмы позволил нам сделать вывод в пользу существования достаточно толстых токовых слоев в хромосфере Солнца. Это естественным образом объясняет происхождение наблюдаемых динамических явлений и выбросов в хромосфере и переходной области. Ведь именно на хромосферном уровне происходит формирование «магнитного балдахина» (magnetic canopy), что должно приводить к аннигиляции магнитных полей соседних силовых трубок. В пользу такого механизма возникновения солнечных спикул свидетельствует, в частности, и обнаруженная с помощью На наблюдений на наземном телескопе Themis разнонаправленность потоков хромосферной плазмы в основаниях и верхней части темных узелков.

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г., «Амбиполярная диффузия и магнитное пересоединение», *Астрономический журнал*, 2012, том 89, №2, с.1–8 (в печати).

1.7.3. Минутные колебания магнитного поля в фотосфере Солнца по наблюдениям на SOT/Hinode

Наблюдения с помощью спектрополяриметра SP (spectro-polarimeter) телескопа SOT/Hinode (Solar Optical Telescope) в линиях железа FeI λ 6301.5, 6302.5 Å, формируемых на уровне нижней фотосферы, позволили одновременно измерять флуктуации интенсивности, скорости и магнитного поля (амплитудой до 1–5 Гс) с временным разрешением ~ 100 с.

Сравнительно недавно в результате наблюдений 14 участков солнечной поверхности с повышенной концентрацией магнитного поля на космическом телескопе SOT/Hinode Фуджимуре и Цунете удалось обнаружить колебания лучевой скорости, интенсивности и продольного магнитного поля в порах и межгранульных магнитных элементах с периодами $T_p = 3$ –6 и 4–9 мин соответственно. Относительные изменения интенсивности $\delta I/I$ и магнитного поля $\delta B/B$ не превышали 1%, тогда как амплитуды возмущенной скорости δV лежали в пределах 0.03–0.12 км/с. Было также установлено, что разность фаз

между возмущениями интенсивности φ_I и магнитного поля φ_B равна π радиан, тогда как между фазами φ_B и лучевой скорости φ_V она составила $-\pi/2$. Это исключало связь между магнитными осцилляциями и изменениями оптической толщины, а также возможность распространения бегущих волн в источнике.

Рассмотрены пульсации магнитного поля, лучевой скорости и интенсивности излучения в фотосфере Солнца с периодами 3–6 мин и 4–9 мин, выявленные Фуджимурой и Цунетой (Astrophys.J., 2009, 702, 2, 1443) из космических наблюдений на телескопе SOT/Hinode, в порах и на границе гранул, соответственно. В предположении, что за обнаруженные осцилляции ответственны магнитогидродинамические волны, возбуждаемые в тонких магнитных трубках конвективными движениями плазмы, исследованы фазовые зависимости между возмущениями магнитного поля, скорости и интенсивности медленных магнитозвуковых мод. В отличие от Фуджимуры и Цунеты, связавших осцилляции с формированием стоячих волн, показано, что наблюдаемые особенности можно объяснить резонансным возбуждением нераспространяющихся медленных магнитозвуковых мод (evanescent modes) в фотосфере Солнца.

Основные результаты работы.

1) Пренебрежение силой тяжести в фотосфере Солнца при рассмотрении МГД-осцилляций магнитных трубок с периодами $T_p > 1$ мин может приводить к некорректным выводам.

2) Наблюдаемые на SOT/Hinode фазовые закономерности между возмущенными величинами пульсаций в порах и межгранульных магнитных элементах вызваны возбуждением резонансных ММЗ-колебаний.

3) В магнитных трубках солнечной фотосферы ММЗ-колебания с $T_p = 1-10$ мин генерируются наиболее эффективно.

Цап Ю., Степанов А., Копилова Ю., "Хвилинні коливання магнітного поля в фотосфері Сонця за спостереженнями на SOT", ВІСНИК Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2012 (в печати).

1.7.4. Реалистичная модель источника суб-терагерцового нетеплового излучения во вспышках, объясняющая форму частотного спектра

Проведен поиск специфических условий в солнечных вспышечных петлях, которые позволяют объяснить появление недавно обнаруженного суб-терагерцового (суб-ТГц) спектрального пика излучения вспышек наряду с микроволновым пиком [1] на основе гиросинхротронного механизма излучения. Ранее было показано [2,3], что этот механизм может быть применим только в случае нереально малых размеров источника излучения - менее 1" и больших значений магнитного поля в нем - более 2000 Гс. Такие условия необходимы для создания большой оптической толщины и формирования низкочастотного завала в спектре суб-ТГц излучения. Однако следует отметить, что в этих исследованиях рассматривался слишком простой, однородный источник.

В настоящей работе детально исследованы свойства гиросинхротронного и тормозного излучения в комбинации с различными нестационарными и неоднородными пространственными распределениями релятивистских электронов, плотности плазмы и температуры во вспышечных петлях. Предложенная в итоге модель способна объяснить одновременное появление двух спектральных пиков (микроволнового и суб-терагерцового) даже в рамках модели одиночной тонкой вспышечной петли. Ключевым в модели является образование повышенной концентрации релятивистских электронов в нижней части петли, где соотношение плотности плазмы n_0 к магнитному полю B достаточно велико, чтобы частота Раизина $f_R = 20 n_0/B$ достигала значений $f_R \sim 200$ ГГц. Показано, что такая ситуация реализуется, если энергичные электроны инжектируются в вершине петли вдоль силовых линий магнитного поля в конусе углов порядка 30-40

градусов. Установлено, что в этом случае суб-терагерцовая и микроволновая спектральные компоненты излучения генерируются в различных частях вспышечной петли - вблизи оснований и в ее вершине, соответственно. Низкочастотная часть суб-терагерцового спектрального пика синхротронного излучения формируется за счет эффекта Разина и ее источник является оптически тонким. Последнее позволяет получить суб-терагерцовый пик излучения как суммарное излучение от протяженной аркады вспышечных петель с общим размером до десятков угловых секунд.

Цитированная литература:

- [1] Kaufmann P., et al. // *Astrophys.J*, 2004, v.603, p.L121
- [2] Silva A.V.R. et al. // *Solar Physics*, 2007, v.245, p.311
- [3] Fleishman G.D., Kontar E. // *Astrophys.J*, 2010, v.709, p.L127

Melnikov V.F., J.E.R. Costa, P. Simoes. A model of microwave and Sub-THz emission from a single flaring loop. // *Solar Physics* 2011 (submitted)

Melnikov V.F., Yu.E. Charikov and I.V. Kudryavtsev. Directivity and spatial variations of hard X-rays in solar flares. // *Solar Physics* 2011 (submitted)

1.7.5. Пространственно разрешенные наблюдения множественных периодичностей во вспышечной петле

Проведено детальное исследование пространственной структуры пульсаций микроволнового излучения на примере конкретной вспышечной петли. Анализ пространственных особенностей амплитуд, фаз, соотношения периодов квазипериодических пульсаций (КПП) эволюции их во времени, в совокупности со знанием интенсивности, пространственных размеров и т.д., дополнит имеющийся набор методик и позволит более точно определять физические условия и механизм генерации КПП в солнечных вспышках. Для такого анализа была выбрана вспышка 3 июля 2002 г. Она была зарегистрирована радиогелиографом Нобейма с высоким угловым ($10''$ на 17 ГГц) и временным (до 100 мс) разрешением и имела интересные противоречивые свойства КПП. Методами корреляционного и Фурье анализа интегрального сигнала этой вспышки были обнаружены КПП с периодами $P \approx 20$ и $P \approx 30$ с (Kupriyano et al., 2010, *SoPh*, 267, 2, 329). В то же время вейвлет анализ, напротив, показал наличие лишь одной спектральной компоненты, но с дрейфом периода от $P \approx 20$ с до $P \approx 30$ с.

Методами корреляционного, Фурье и вейвлет анализа пространственной структуры вспышки показано, что существуют два пространственно разделенных источника пульсаций с относительно постоянными периодами $P_1 \geq 30$ с и $P_2 \approx 20$ с. Источник КПП с периодом $P_1 \geq 30$ с локализован во внутренней части вспышечной области, между основаниями корональной петли. КПП с периодом $P_2 \approx 20$ с имеют максимальную амплитуду на периферии вспышечной области, на концах вспышечной петли. Показано, что дрейф периода, наблюдаемый в вейвлет спектре интегрального сигнала, обусловлен постепенным перераспределением радиояркости и амплитуды пульсаций от периферийного источника к внутреннему. Наибольшая глубина модуляции полного потока наблюдается на периферии вспышечной области и достигает значений 6-10 %, в то время как в ее центральной части ее величина не превышает пяти процентов.

На основе решений дисперсионного уравнения для собственных колебаний прямой однородной магнитной трубки проведено отождествление колебательных мод. Показано, что наблюдаемые периодичности наиболее точно описываются основной и второй гармониками изгибных (кинк) осцилляций.

Куприянова Е.Г., Мельников В.Ф. «Пространственная структура квазипериодических пульсаций на основной и второй гармониках кинк моды в одиночной вспышечной петле» Сб. трудов конференции "Солнечная и солнечно-земная физика» 2011,147-150.

1.8. Эволюция бездиссипативных МГД разрывных структур в корональной плазме и в плазме солнечного ветра (ГАО, Рук: д.ф.-м.н. С.А.Гриб)

1.8.1. Изучение взаимодействия солнечного вращательного разрыва с контактным разрывом в переходной от хромосферы к короне области.

В рамках магнитогидродинамической (МГД) теории распада произвольного разрыва был рассмотрен переход солнечных бездиссипативных вращательных МГД разрывов в диссипативные быстрые ударные волны вследствие их преломления при переходе через стационарные контактные разрывы (сильного МГД разрыва), характеризующиеся резким изменением величины плотности плазмы в солнечной переходной области. Доказана возможность возникновения в короне Солнца преломленной медленной ударной волны, вызывающей небольшое уменьшение величины магнитного поля при значительном возрастании концентрации заряженных частиц и увеличении температуры плазмы. Указано на сильное затухание медленных ударных волн в верхних слоях корональной плазмы за счёт затухания Ландау. Возникновение сильных вращательных разрывов из волн Альфвена в хромосфере Солнца непосредственно связывается со сдвигом скоростей. Подчёркивается влияние рассматриваемого процесса на развитие взрывных процессов в хромосфере и на движение корональных плазмоидов.

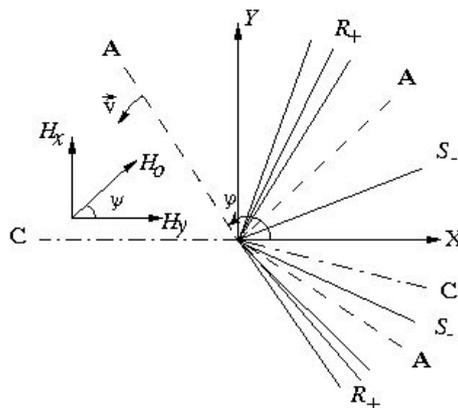


Рис. Схема взаимодействия солнечного вращательного разрыва A с контактным разрывом C в переходной от хромосферы к короне области

1.8.2. О преломлении вращательного разрыва и ударной волны внутри плазмосферы Земли.

Плазмопауза описывается контактным МГД разрывом, при переходе через который с солнечной стороны внутри магнитосферы скачком в 100 раз растёт величина плотности заряженных частиц. Как показывает МГД расчёт, при угле между направлением магнитного поля и контактным разрывом, большим 90 градусов внутри плазмосферы возникает преломлённая быстрая ударная волна малой интенсивности. Кроме того, как известно в МГД, для сильного начального магнитного поля при почти параллельном падении вращательного разрыва на плазмопаузу могут возникнуть области разрежения плазмы, в которых плотность частиц будет падать больше, чем на два порядка, что вызывается большим касательным импульсом, сообщаемым магнитным полем плазме во вращательных разрывах. Некоторые экспериментальные данные подтверждают это утверждение.

С.А.Гриб. Возможно ли ударное возмущение планетарной магнитосферы из-за влияния стационарного тангенциального разрыва солнечного ветра? «Солнечная и солнечно-земная физика 2011». СПб, Пулковое, 3-7 октября 2011 года, с.259-264.

С.А.Гриб. Об одном механизме возникновения обратной ударной волны солнечного ветра в магнитослое перед магнитосферой Земли. Письма в Астр.ж., 2011, т.37, № 12, с.955-960.

1.9. Влияние долговременных вариаций крупномасштабного магнитного поля на распространение солнечного ветра и параметры космической погоды” (ГАО, Руководитель д.ф.-м.н. А.Г. Тлатов)

1.9.1. Исследование свойств эфемерных магнитных областей на Солнце

Рассмотрены результаты анализа солнечной активности в линии CaII K за период 1907-1999 гг. по ежедневным наблюдениям обсерватории Kodaikanal. Проведен анализ распределения площади, координат и яркости эфемерных точек. Анализ включал процедуру калибровки изображений, основанный на учете интенсивности рассеянного света и определения характеристики фотопластинок.

Найдена связь между широтой θ_1 появления эфемерных областей и амплитудой текущего цикла. Средняя широта распределения эфемерных областей имеет 11-летнюю цикличность, достигая максимума θ_1 на фазе роста солнечной активности. Наибольшая широта была зафиксирована в 1956,2 году, т.е. за $\sim 1,5$ года до наступления максимума 19-го цикла активности. Величина θ_1 связана с амплитудой текущего цикла активности (Рис. 1). Минимальные значения широты θ_2 достигаются на фазе минимума солнечной активности. Значения широты θ_2 также связаны с амплитудой цикла солнечных пятен, а опережая его на 16-17 лет. Т.е. существует связь между широтой эфемерных областей в минимуме цикла n и амплитудой цикла активности $n+1$ (Рис. 2). Коэффициент корреляции между значениями широты θ_2 и амплитудой цикла $n+1$ $R=0.92$.

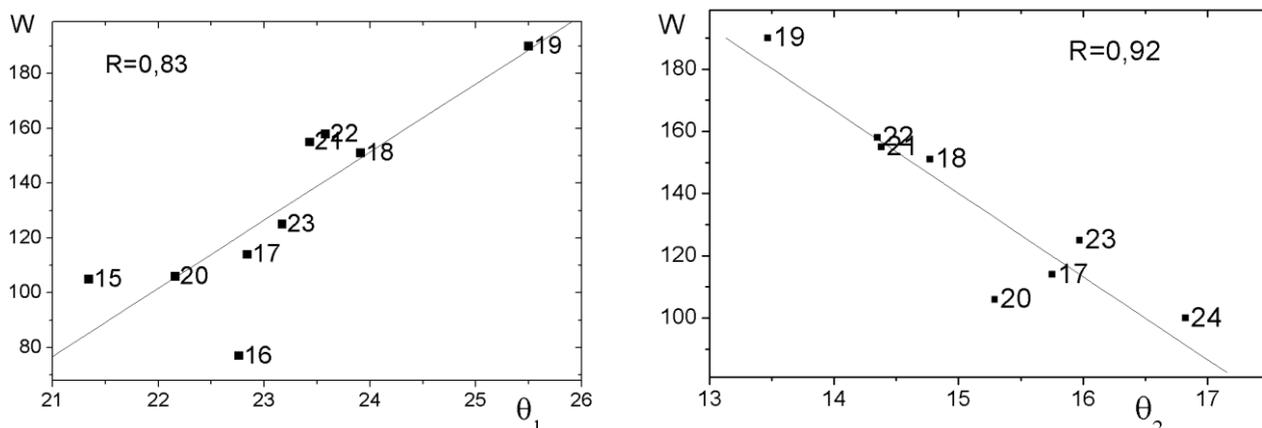


Рис.1. (Слева) Связь между широтой θ_1 распределения эфемерных областей и амплитудой циклов активности. (Справа) Связь между широтой θ_2 распределения эфемерных областей и амплитудой циклов активности.

Platov, A. G.; Pevtsov, A. A. The latitude of ephemeral regions as an indicator for solar-cycle strength. // Memorie della Societa Astronomica Italiana, v.81, p.814, 2010.

Platov, A. G.; Pevtsov, A. A. Latitude of Ephemeral Regions as Indicator of Strength of Solar Cycles // eprint arXiv:1008.0185

1.9.2. Наблюдение солнечного затмения 29 марта 2006 в радиодиапазоне на длинах волн 3,2 и 4,9 см

Выполнен анализ данных наблюдений солнечного затмения 29 марта 2006 на радиотелескопах РТ-3 ($\lambda = 4,9$ см) и РТ-2 ($\lambda = 3,2$ см) Кисловодск солнечной станции Пулковской астрономической обсерватории РАН. Регистрация потока излучения проводилась электронным методом с временным разрешением 0,5 с. Определены компактные источники на солнечном диске, и вклад корональных дыр в интегральный поток определяется. Наблюдения сравнивались с наблюдениями в оптическом и рентгеновском диапазонах. Оценена интенсивность источников за лимбом Солнца. Отношение интенсивности излучения в максимальной фазе к излучению до затмения составляла 3,7 и 5,9% за 3,2 и 4,9 см, соответственно.

Shramko, A. D.; Senik, V. A.; Tlatov, A. G. Observations of March 29, 2006 solar eclipse in the radio range at wavelengths of 3.2 and 4.9 cm. *Cosmic Research*, v. 49, pp.93-98, 2011

1.9.3. Влияние крупномасштабного магнитного поля на формирование солнечной короны и солнечного ветра.

На основе анализа формы солнечной короны во время затмений активности в период 1878-2009 гг. и наблюдений солнечной короны на коронографах в белом свете Mark-3/4 и SOHO/Lasco-2 telescopes (1980-2010) показано, что форма короны имеет как 11-летние так и долговременные вариации. Корональные лучи в эпоху минимума активности и фазы спада, как правило, развернуты по направлению к солнечному экватору. Наибольшее отклонение лучей от радиального направления происходит в эпоху минимума активности. Установлена связь между углом отклонения от радиального направления $\Delta\theta$ параметрами гелиосферного токового слоя и параметрами солнечного ветра. (Рис.1.). Т.о. крупномасштабное поле влияет на форму короны, и формирует поток солнечного ветра, изменяя его параметры.

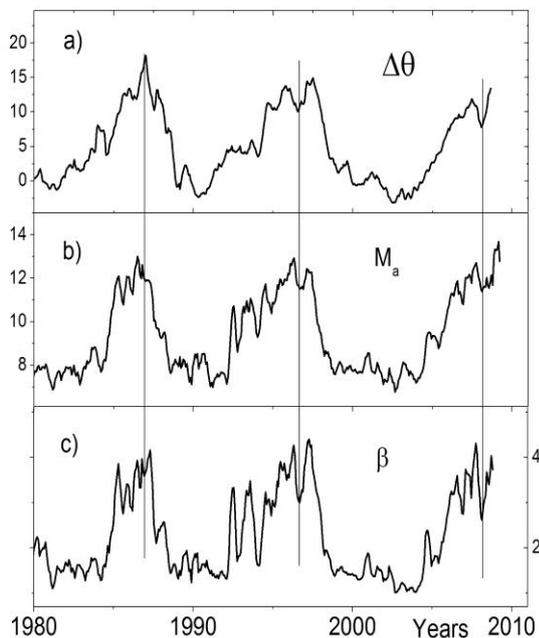


Рис. 1. Сравнение между а) отклонением корональных стримеров от радиального направления $\Delta\theta$ с параметрами солнечного ветра по данным базы данных OMNI2 б) Альфвеновское число Мах M_a и с) параметр плазмы β . Данные параметров солнечного ветра усреднены во 20 бартельсовским оборотам.

A.G. Tlatov, B.P. Filippov, Impact of the large-scale solar magnetic field on the solar corona and solar wind. In book "Solar Wind", Издательство Intech, ISBN 979-953-307-380-3
Book edited by: Dr. Marian Lazar, Ruhr-University Bochum, Germany

1.9.4. Долговременные вариации атмосферного ореола по данным наблюдений солнечной короны на Горной станции ГАС РАН в период 1957-2010 гг.

Выполнен анализ данных уровня рассеянного света по данным ежедневных наблюдений на солнечном коронографе Горной станции в период 1957-2010 гг. около корональных спектральных линий 5303А и 6374А. Наблюдения выполнялись вблизи солнечного лимба и нормировались к интенсивности в центре диска Солнца. Выявлены вариации различной длительности. В частности сезонные вариации, локальные максимумы длительностью несколько лет и долговременные тренды. Установлено, что локальные изменения уровня рассеянного света могут быть вызваны вулканическими извержениями. В результате анализа установлена тенденция к росту величины рассеянного света примерно на 40% в течение последних 50 лет. Проведено сравнение вариаций уровня рассеянного света с концентрацией атмосферного аэрозоля. Долговременный рост уровня рассеянного света близок к изменениям приповерхностной температуры Земли, и возможно, связан с глобальным изменением климата (Рис. 2).

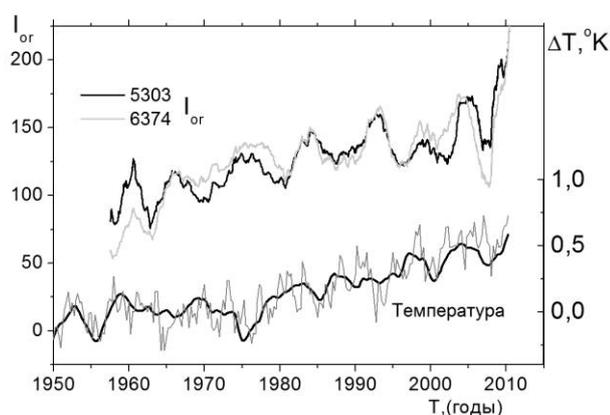


Рис. 2. Сравнение изменений атмосферного ореола и отклонений среднегодовой приземной атмосферной температуры.

Долговременные вариации атмосферного ореола по данным наблюдений солнечной короны на Горной станции ГАС РАН в период 1957-2010 гг. А. Х. Алиев, А. Г. Тлатов, Журн. "Оптика атмосферы и океана" (в печати)

1.10. МГД-Моделирование активных солнечных образований (ГАО, Руководитель: д.ф.-м.н., проф. Соловьев А.А.)

Скрученные магнитные силовые трубки (магнитные жгуты) представляют собою один из наиболее важных элементов солнечной активности в целом. Обычно в солнечной атмосфере магнитный жгут окружен квазипотенциальным магнитным полем, которое обеспечивает равновесие жгута в поперечном сечении. В резистивной среде такая система подвержена диссипативной эволюции в силу того, что снаружи в потенциальном поле диссипация отсутствует, а внутри жгута, где плотность токов отлична от нуля, часть магнитной энергии постоянно конвертируется в тепловую, понижая тем самым внутреннее магнитное давление, противостоящее давлению внешней среды. Это приводит к радиальному сжатию магнитного жгута со скоростью, определяемой проводимостью плазмы и характерным пространственным масштабом изменения магнитного поля в жгуте. В данной работе получены новые точные решения, описывающие самоподобное равномерное сжатие магнитного жгута с линейным бессильным внутренним полем ($\alpha = const$). Формально радиус жгута a уменьшается до нуля за конечное время. Это время для жгута с радиусом в несколько сотен км оказывается относительно небольшим (несколько часов), если спиральность магнитного поля в жгуте достаточно велика: $\alpha a \gg 1$.

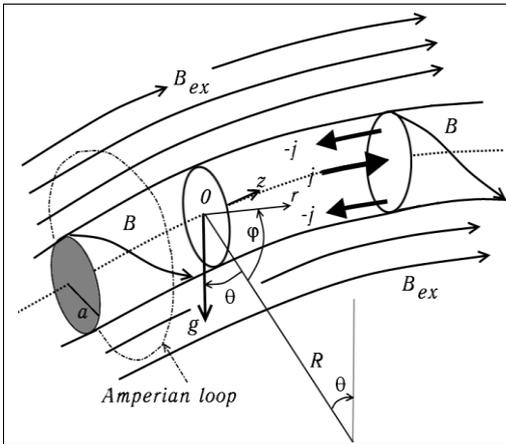


Рис.1. Геометрия магнитного жгута; полный ток через поперечное сечение равен нулю.

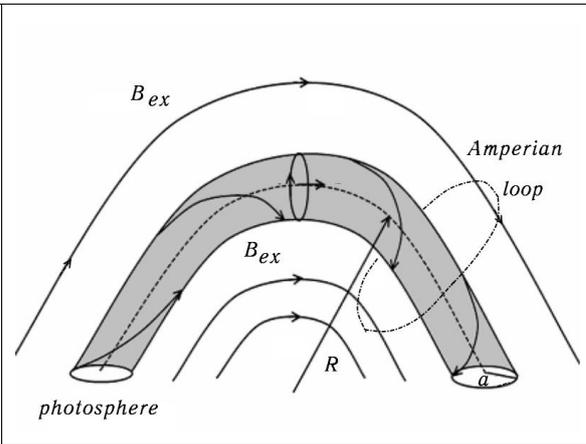


Рис. 2. Магнитная петля во внешнем квазипролонгальном магнитном поле.

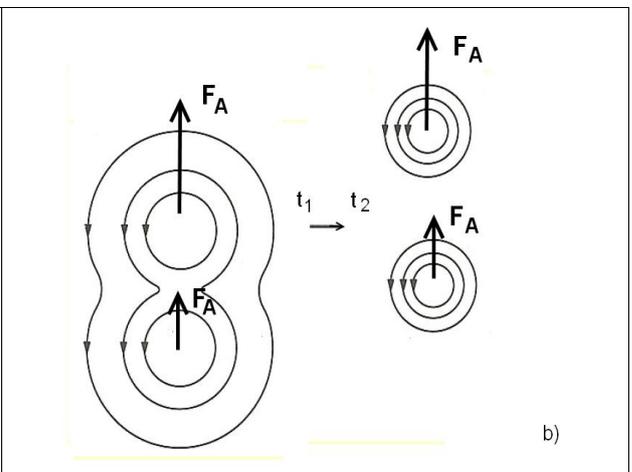
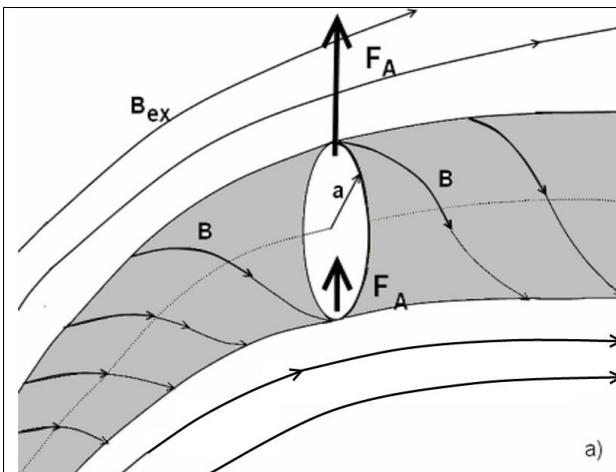


Рис.3, а) В поперечном сечении магнитного жгута радиуса $a \gg H$ имеется большой градиент подъемной силы. Это приводит к разделению жгута на отдельные тонкие жгутики (б), в каждом из которых поток азимутального поля равен потоку этого поля в «родительском» жгуте.

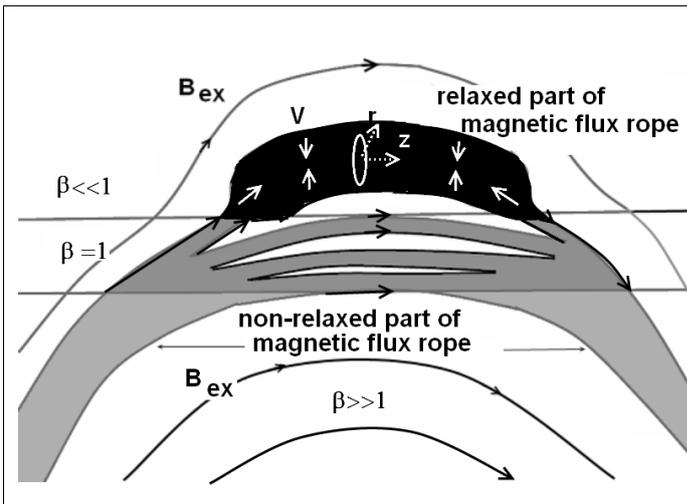


Рис.4. Под фотосферой, где $\beta \gg 1$, магнитная структура жгута определяется движениями плазмы. Вблизи фотосферы $\beta \approx 1$ и велик градиент подъемной силы, разрывающей жгут. Выше, в переходном слое и хромосфере, $\beta \ll 1$; здесь структура поля жгута в процессе топологической релаксации приближается к распределению (9). Белые стрелки - скорости плазмы в сжимающемся магнитном жгуте и локальная цилиндрическая система координат.

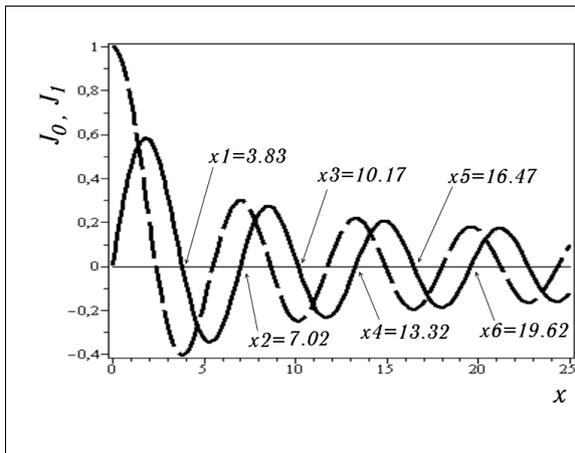


Рис.5. Функции Бесселя нулевого (пунктирная линия) и первого (сплошная линия) порядка. Стрелками указаны положения первых 6-ти нулей функции $J_1(x)$

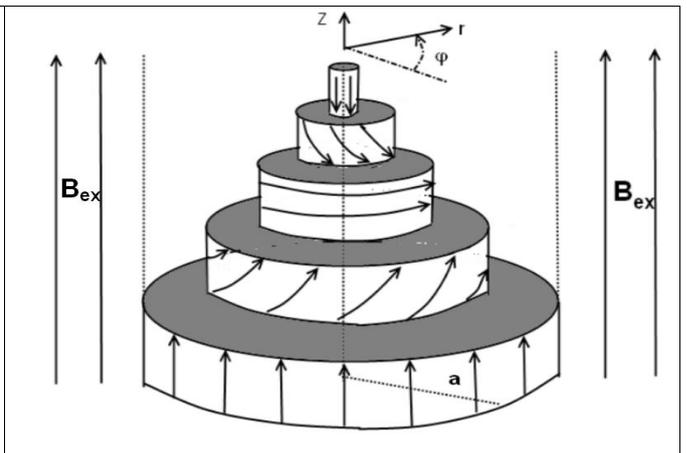


Рис.6. Изменение пространственной ориентации магнитных силовых линий при переходе от одной магнитной поверхности к другой в жгуте (9) для случая $(\alpha a)_1 = x_{1,1} = 3.8317$.

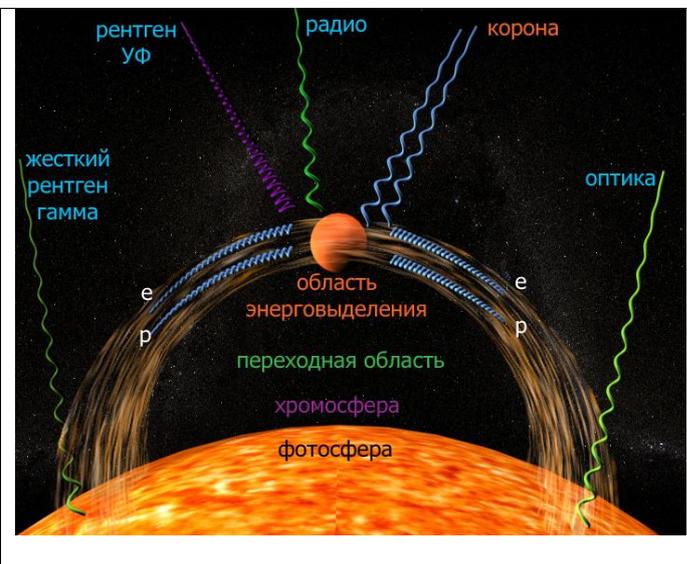
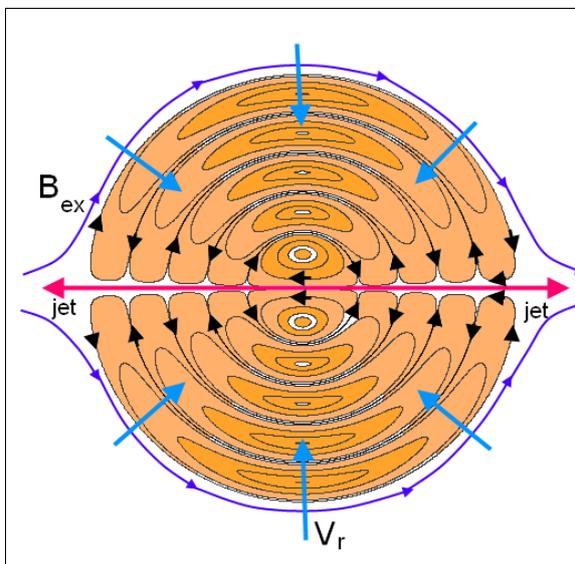


Рис. 7. В результате продольного сжатия часть магнитного жгута, в которой поле после топологической релаксации распределилось согласно формулам (9), примет сферическую форму, заполненную бессильным магнитным полем, имеющим вид магнитных тороидов, вписанных в сферические слои [37]. На оси симметрии шара магнитное поле строго радиально и знакопеременно в пространстве. Внешнее магнитное поле, обтекающее сферу, имеет потенциальный характер.

Основные результаты:

1. Изложены основы теории магнитных жгутов в космической плазме. Получены новые точные МГД-решения, описывающее диссипативное сжатие магнитных жгутов в хромосферной плазме. Показано, что при определенных условиях (при достаточно большой скрученности поля) время диссипативного коллапса магнитного жгута сравнимо с характерным временем солнечной вспышки

2. Новое обобщение известного решения Чандрасекхара-Прендергаста (1956) для сферического магнитного вихря в потенциальном внешнем магнитном поле на случай действия однородного поля силы тяжести использовано для моделирования недавно открытых в солнечной короне российскими космическими аппаратами Коронас (эксперимент «СПИРИТ») горячих рентгеновских объектов (“spiders”).

3. Построена новая теоретическая модель корональной дыры (КД), магнитное поле которой складывается из двух магнитных потоков: открытого и замкнутого на окружающую КД хромосферу. Получены простые аналитические формулы, описывающие распределения температуры и плотности в КД. Показано, что эти распределения критическим образом зависят от соотношения поперечного размера дыры и шкалы высоты в окружающей короне.

4. На основе данных Solar Dynamic Observatory (AIA/SDO) о динамике двух конкретных солнечных вспышек (7.06.2011 и 22.09.2011) показаны возможности их моделирования жгутовыми магнитными структурами.

А.А. Соловьев. Диссипативный коллапс магнитных жгутов с бессиловым внутренним полем. *Астрономический Журнал*, 88, №11, с.1111-1123. (2011)

А.А. Соловьев, Е.А. Киричек «Сферический магнитный вихрь в однородном поле сил тяжести: новое точное решение и его применения для моделирования вспышек и корональных спайдеров». *Письма в Астрономический Журнал*, т. 37, №11, с. 855-862 (2011)

В.И.Ефремов, Л.Д.Парфиненко, А.А. Соловьев Колебания солнечных пятен по магнитограммам SOHO/MDI. *Космические исследования*, 50, №1, с.48-52 (2012)

В.Н. Обридко, А.А. Соловьев «Магнитогидростатическая модель корональной дыры». *Астрономический Журнал*. т. 88, №12, с.1238-1248

Efremov V.I., Parfinenko L.D. Solov'ev A.A. *Solar Physics*. (2011) (Submitted)

Соловьев А.А., Гусева С.Г., Шрамко А.А. Магнитное поле корональной дыры в гелиосфере: закон обратных квадратов. *Письма в АЖ* (направлено в печать)

1.11. Микроволновое излучение активных областей и колебательные процессы в радиоисточниках над пятнами (ГАО, Руководитель д.ф.-м.н., Боровик В.Н.)

1.11.1. По анализу микроволнового излучения двух вспышечно-активных областей NOAA 10030 (июль, 2002) и NOAA 11158 (февраль, 2011), близких по структуре и высокому уровню вспышечной активности, выявлена общая особенность в спектре микроволнового излучения АО за 1-2 дня до мощных вспышек X класса (GOES), свидетельствующая о развитии "пекулярного" радиоисточника в результате образования в АО магнитной δ -конфигурации. Полученный результат рассматривается как прогностический фактор.

1.11.2. На основе развитого ранее топологического метода обнаружения элементов вспывающего потока по магнитограммам SOHO/MDI и SDO/HMI показано, что увеличение вспышечной активности в группе тесно связано с изменением топологии поля - величина несвязности (количество пикселей на изображении, различимых по значениям напряженности с точностью до заданного порога), отслеживает вспышечную активность, существенно увеличиваясь перед возникновением серии вспышек. По другой топологической характеристике изменение вспышечной активности коррелирует с топологическими вариациями в областях с большими напряженностями поля (не менее 700 гс). Продемонстрировано применение метода к анализу вспышечно-активной группы АО 10030 (июль, 2002).

1.11.3. Сделан обзор результатов наблюдений корональных выбросов массы (CMEs) и связанных с ними явлений, полученных за последние десятилетия с бортов спутников SOHO и STEREO, исследованы статистические связи между CME и вспышками. Показано, что CME, связанные со вспышками, имеют более высокие скорости, чем CME, не связанные со вспышками. Ширина CME пропорциональна рентгеновскому потоку вспышки.

1.11.4. Короткопериодические (3, 5, 8-10 минут) колебания излучения активных областей отражают волновые процессы, происходящие в них, и исследование короткопериодических колебаний является мощным средством диагностики солнечной плазмы. В частности, одновременный анализ колебаний в различных диапазонах позволяет изучать МГД волны, распространяющиеся вдоль магнитной силовой трубки пятна.

Выполнено сопоставление спектров короткопериодических колебаний микроволнового излучения пятен на частоте 17 ГГц по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма, генерируемого на высоте переходного слоя и нижней короны, и колебания лучевых скоростей по наблюдениям в линии H α на Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН. Кросс-вейвлет преобразование (рис.1) и вейвлет-когерентность уверенно выделяют общие цуги колебаний.

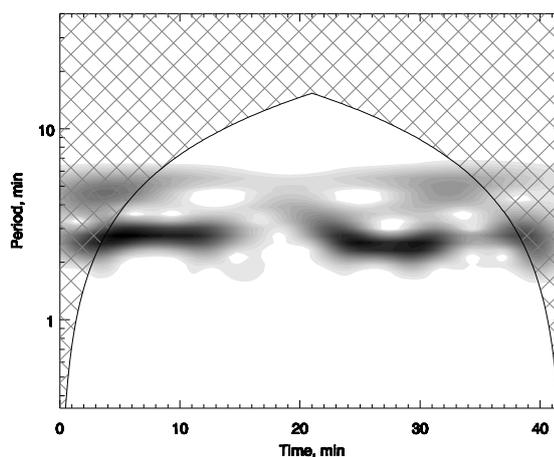


Рис. 1. Кросс-вейвлет преобразование ($W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) \cdot W_n^{Y*}(s)$, где $W_n^X(s)$ и $W_n^Y(s)$ - вейвлет преобразования временных серий, n - время, s - масштаб, звёздочка обозначает комплексное сопряжение) между временными сериями, полученными по радио и оптическим наблюдениям для NOAA 10661. Тёмные области показывают общие цуги колебаний.

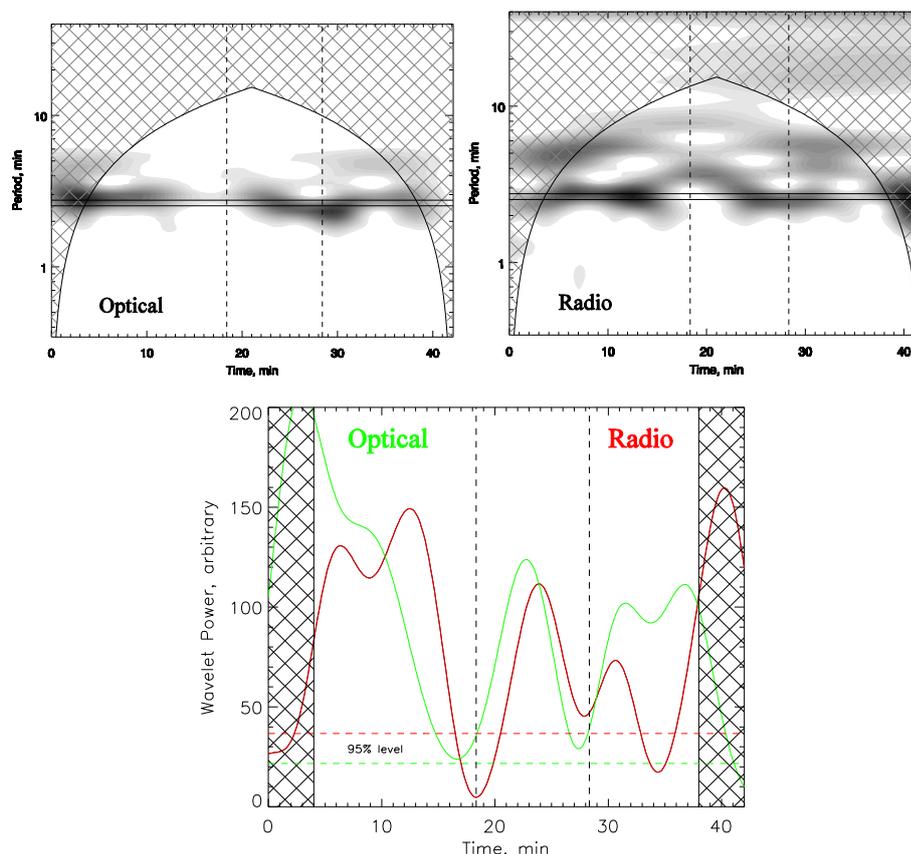


Рис. 2. Вейвлет-спектр лучевых скоростей в линии $H\alpha$ (вверху слева) и максимальной яркостной температуры пятенного радиоисточника на волне 17 ГГц (вверху справа) NOAA 10661. На нижнем графике показаны мощностные кривые, полученные усреднением вейвлет-мощности в интервалах частот 6.0-6.5 мГц (165-155 сек). Интервалы указаны горизонтальными линиями на верхних рисунках.

В то же время нестабильный характер колебаний дал возможность выявить похожие детали трёхминутных колебаний, имеющие небольшой сдвиг по времени, в вейвлет-спектрах, полученных из оптических и радио наблюдений (рис.2). Цуги колебаний микроволнового излучения запаздывают по отношению к цугам колебаний лучевых скоростей. Время задержки (45 сек) интерпретируется как время распространения вверх МГД-волн в магнитном поле пятна. Оценена высота области радиоизлучения - 2700 км.

1.11.5. Выполнен сравнительный анализ спектров короткопериодических колебаний микроволнового излучения солнечных пятен на частоте 17 ГГц по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма в трёх вспышечно-активных областях (NOAA 9608, 9866, 10139). Выявлено существенное различие спектров колебаний до и после вспышек. Обнаружен случай значительного усиления мощности трёхминутных колебаний за 15-20 минут до всплеска микроволнового излучения (рис.3). Возможная интерпретация эффекта – связь между медленными магнитозвуковыми волнами, распространяющимися вдоль магнитного поля пятна снизу вверх и вспышечными процессами.

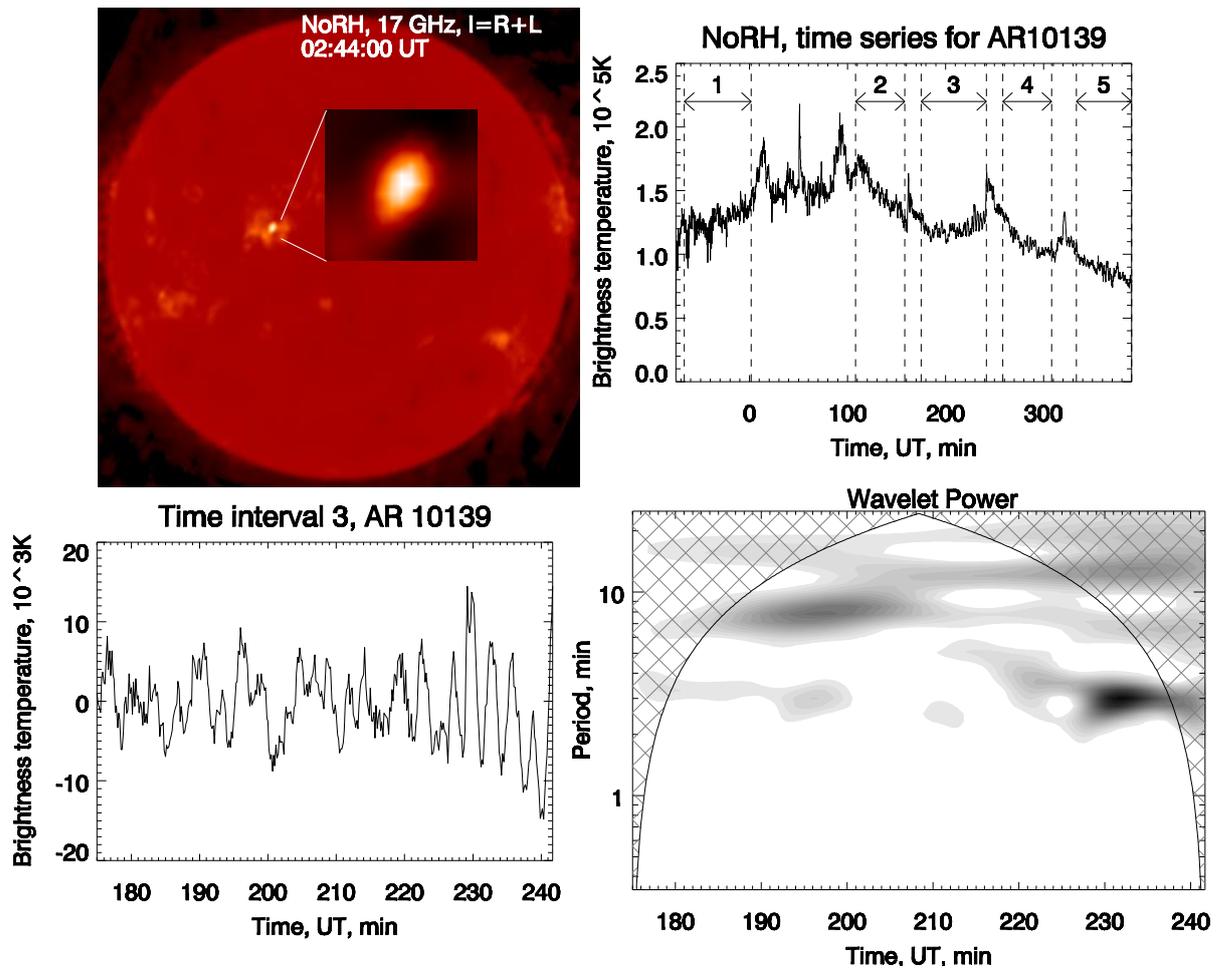


Рис. 3. Вверху слева: радиоизображение Солнца на частоте 17 ГГц (1.76 см), полученное на радиогелиографе Нобеяма, дополнительно приведено увеличенное изображение источника NOAA 10139. Вверху справа: временной профиль максимальной яркостной температуры источника NOAA 10139. Внизу слева: фрагмент 3 временного профиля. Внизу справа: вейвлет-спектр фрагмента 3.

Abramov-Maximov, V. E.; Gelfreikh, G. B.; Kobanov, N. I.; Shibasaki, K.; Chupin, S. A. Multilevel Analysis of Oscillation Motions in Active Regions of the Sun, *Sol.Phys.* Vol. 270, Issue 1, pp.175-189, 2011.

Abramov-Maximov, V.E., Gelfreikh, G.B., Shibasaki, K. Quasi periodic oscillations of solar active regions in connection with their flare activity - NoRH observations. *Solar Physics*, vol. 273, Issue 2, pp.403-412, 2011.

1.12. Динамика солнечных магнитных полей по данным Solar Dynamic Observatory (ГАО, Рук.: д.ф.-м.н. Беневоленская Елена Евгеньевна)

Произведено исследование динамики солнечных магнитных полей на высоких широтах: в области высокоширотной корональной дыры и вне корональной дыры. Рассмотрен период 1-2 августа 2010 года, когда наблюдалась среднеширотная вспышка, сопровождающаяся выбросом волокна, локализованного вне области вспышки. В результате этого процесса произошла крупномасштабная перестройка магнитного поля Солнца. Область корональной дыры характеризуется пониженной плотностью в короне и хорошо определяется по данным обсерватории SDO (AIA) в крайнем ультрафиолете (линия 193А). Известно, что полярная корональная дыра обладает средним магнитным полем доминирующей полярности, хотя полярное и высокоширотное поле на мелких масштабах представляет собой кластеры как положительной, так и отрицательной полярности.

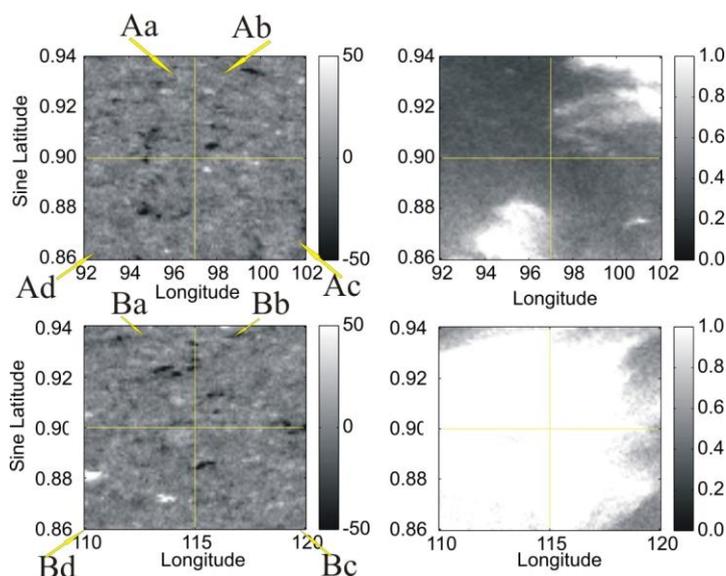


Рис. 1 Слева: магнитные поля (фрагмент синоптической карты от 0.86(59°) до 0.94 (70°) синуса широты и 10 градусов кэррингтоновской долготы), внутри корональной дыры (вверху) и вне её (внизу), SDO/HMI; справа- относительное значение интенсивности в крайнем ультрафиолете (линия 193А), SDO/AIA. 00:13 UT, 01.082011).

Исчезновение волокна повлияло на границы корональной дыры, она сместилась ближе к полюсу, и магнитное и магнитный поток уменьшился в области «Аа». В области корональной дыры скорость всплытия отрицательного и положительного магнитного потоков показывает максимум на временах порядка двух часов, а вне корональной на временах порядка 4 часов и одного часа. Далее, рост интенсивности положительного магнитного потока (новой полярности) сопровождается уменьшением отрицательного потока (старой полярности). Среднее магнитное поле как в области корональной дыра, так и вне её отрицательное, что говорит, что смена полярности ещё не произошла на этих широтах (64° -70°).

Изменения магнитного поля в корональных дырах происходят на временах порядка двух часов и могут быть результатом всплытия мелкомасштабных биполярных структур, или происходить за счёт турбулентной диффузии, которая работает, то, как генератор магнитного поля, то, как диссипативный процесс, включающий пересоединения.

Benevolenskaya, E., Yu.D. Ponyavin 'Synoptic magnetic field in cycle 23 in the beginning of the cycle 24' Adv Space Res. (doi:10.1016/j.asr.2011.05.003).

1.13. Физика солнечных постэруптивных аркад: интерпретация наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 и космическом аппарате STEREO (ИЗМИРАН, ИСЗФ, ГАО, САО)

Уточнена физика постэруптивных аркад на основе результатов одновременных измерений потоков излучения постэруптивных аркад на Солнце в спектральных полосах 171, 195, 284 и 304 Å по данным спутника STEREO и их микроволнового излучения на радиотелескопе РАТАН-600. Для определения дифференциальной меры эмиссии использован оригинальный вероятностный подход. Это позволило определить дифференциальную меру эмиссии в области температур примерно от 0.3 до 15 МК. Последующий расчет теплового магнитотормозного излучения в многотемпературной модели с убывающим с высотой магнитным полем дает спектр, аналогичный наблюдаемому на РАТАН-600. Тем самым показано, что во многих нестационарных событиях не слишком большой мощности тепловая многотемпературная модель вполне

применима для объяснения излучения постэруптивных арочных систем, и нет необходимости привлекать излучение ускоренных частиц. Предлагаемая модель позволяет непосредственно оценить соотношение между магнитным и газовым давлениями в вершинах постэруптивных аркад и определить условия возникновения вторичных нестационарных процессов на фазе затухания основной вспышки.

М.А.Лившиц, А.М.Урнов, Ф.Ф.Горяев, Л.К.Кашапова, И.Ю.Григорьева, Т.И.Кальтман Физика постэруптивных аркад: Интерпретация наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 и космическом аппарате STEREO, АЖ, 2011, том. 88, №10, 997-1007.

Отв.: М.А.Лившиц, (ИЗМИРАН) Ф.Ф.Горяев, Л.К.Кашапова, (ИСЗФ) И.Ю.Григорьева (ГАО РАН), Т.И.Кальтман (САО РАН)

1.14. Сопоставление излучения в короне над пятном в радио и рентгене (САО).

При наблюдениях солнечного затмения 04.01.2011 г. впервые достигнуто предельно возможное угловое разрешение (1 угл") в затменных наблюдениях в микроволновом диапазоне частот, определяемое дифракцией на лунном лимбе. Результат достигнут с использованием крупных радиотелескопов – двух радиотелескопов РТ-32 (обсерватория. Светлое и обсерватория Зеленчукская) и радиотелескопа РАТАН-600. Новые наблюдательные данные с высокой точностью дали оценку координат отдельных деталей структуры источников излучения, что привело к точному измерению эффективной высоты над фотосферой, на которой в короне расположен источник микроволнового излучения над пятнами. С высокой координатной точностью измерено положение центра пятна в радиодиапазоне, которое сопоставлено с изображениями в корональных линиях ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. При этом обнаружено, что измеренная высокая яркостная температура радиоисточника над пятном равная 6 млн. градусов не дает свечения в корональных линиях. Это указывает на различную природу нагрева плазмы в радио и диапазонах EUV и X-ray.

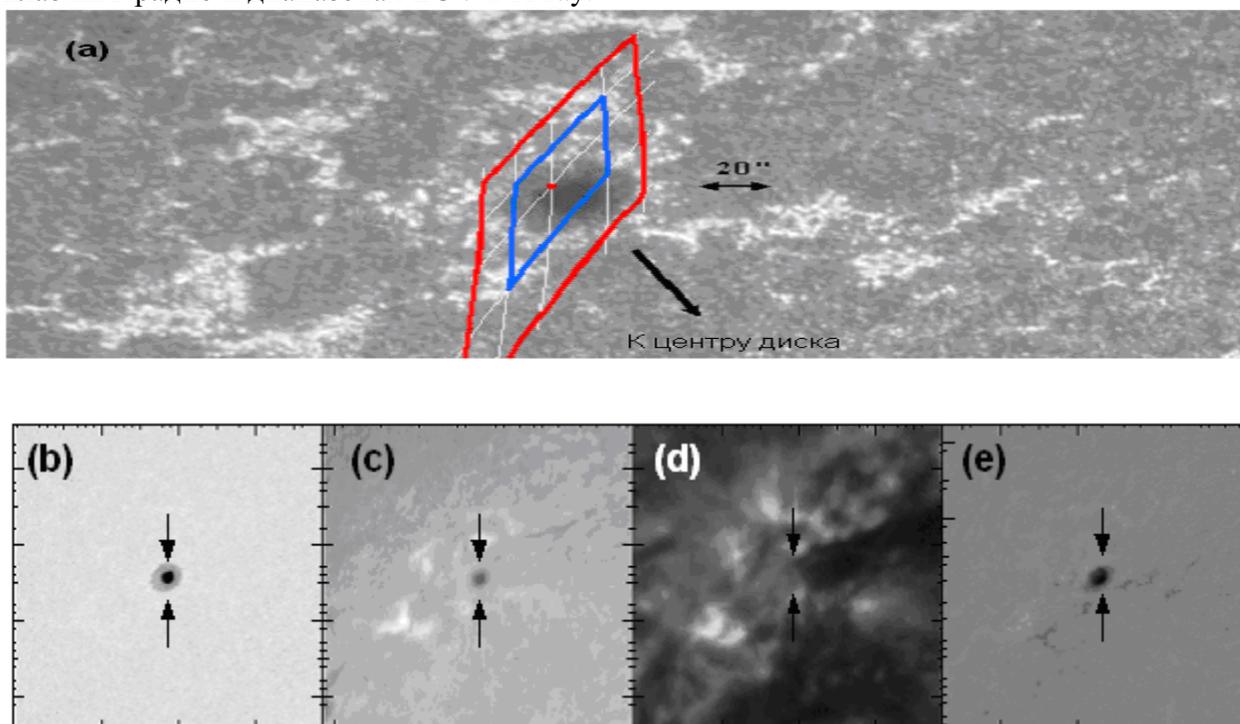


Рис.1 а) Расположение радиоисточника над пятном (в белом свете) в крупном асштабе, Цветными ромбиками показаны положения лимбов Луны. В меньших одинаковых масштабах приведены: б) Изображение пятна в белом свете, с) Изображение пятна в линии $H\alpha$, д) Изображение активной области в линии 171 \AA ,

е) Магнитограмма MDI SOHO.

А. М. Финкельштейн, И. А. Рахимов, А. А. Дьяков, А. Н. Коржавин, Н. А. Топчило, М. Л. Свешников, Н. Г. Петерова. Наблюдения солнечного затмения 04.01.2011 г. на двух радиотелескопах РТ-32 (Светлое и Зеленчукская): первые результаты. Труды ИПА РАН, в печати.

Коржавин А.Н., Петерова Н.Г., Топчило Н.А. О кольцеобразной структуре источника циклотронного излучения над солнечным пятном по наблюдениям с разрешением в 1 угл. сек. Солнечная и солнечно-земная физика 2011, Труды, в печати.

Отв.: Коржавин А.Н., Петерова Н.Г. (САО РАН)

1.15. Развитие метода многоволновой стереоскопии для высотных измерений в солнечной атмосфере (САО, ФТИ, ИСЗФ, СПБУ).

Дальнейшее развитие метод многоволновой стереоскопии получил в результате проведения совместных наблюдений активной области 10956 с помощью трех крупных инструментов ССРТ, ПАТАН-600, и NoRH. Данные высотных измерений магнитных полей над пятнами измеренные на всех трех инструментах согласуются между собой. Как показано в работе [1] данные стереоскопии указывают на завышенные значения магнитного поля с высотой чем полученные в результате реконструкций магнитного поля. При этом обнаружена сильная зависимость от метода реконструкции. На рис.1 приведено сопоставление данных полученных на трех крупных инструментах ССРТ, ПАТАН-600, и NoRH., расчеты реконструкции магнитного поля для потенциального магнитного поля приведены на рис.1(b) и для нелинейного бессилового магнитного поля (NLFFF) на рис.1(a).

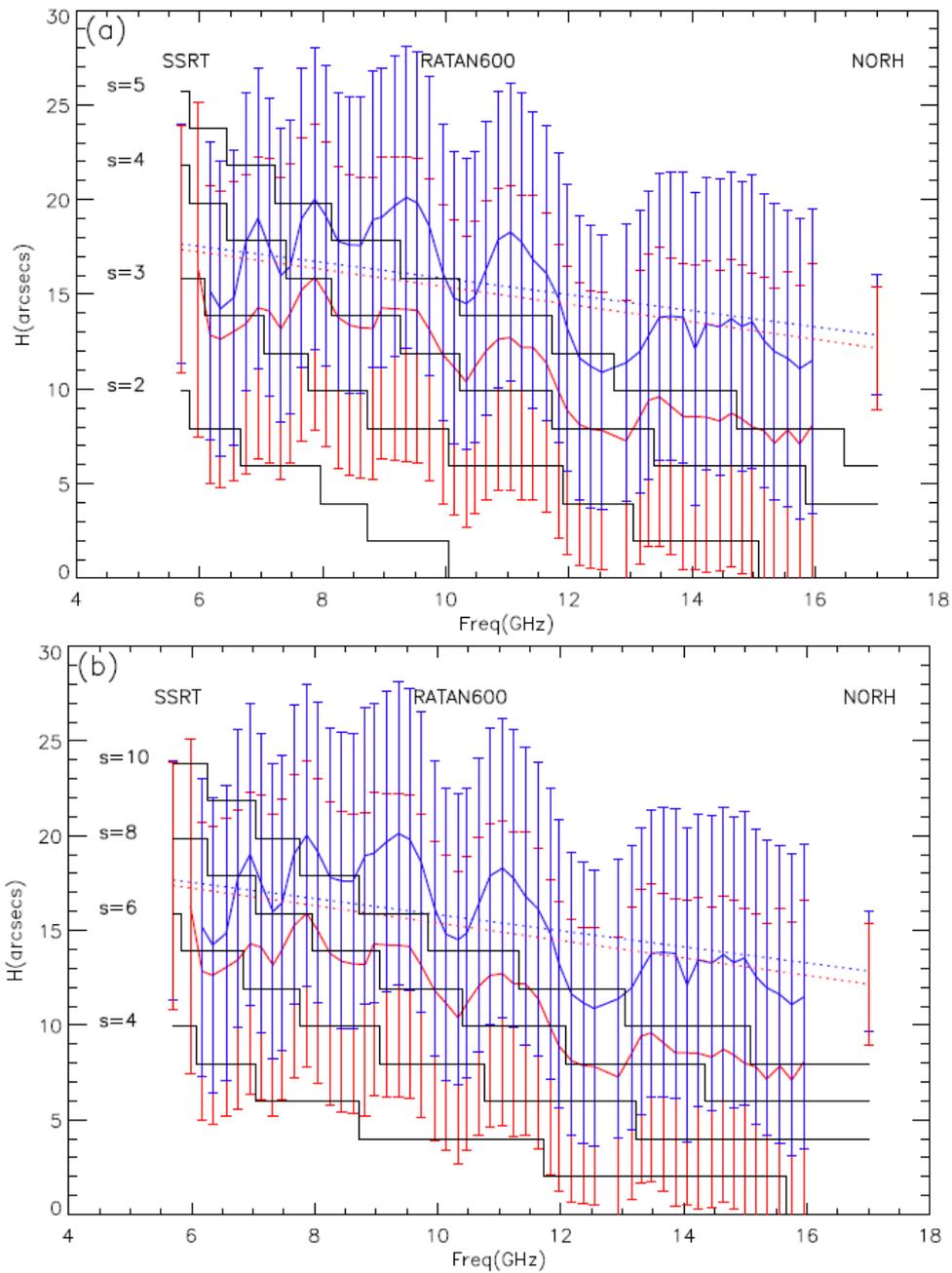


Рис. 1. Оценки высот циклотронных радиоисточников в левой LHP (синие) и правой RHP (красные) круговых поляризациях, и соответствующие ошибки измерения по данным ССРТ, РАТАН-600, и NoRH. Сплошные черные линии, обозначенные $S = 2, 3, 4$ и 5 на графике (а), на которой рассчитаны экстраполяции NLFF и $S = 4, 6, 8$ и 10 на графике (б), представляют собой максимальную высоту, на которой рассчитаны экстраполяции PF. Ступеньки на этих рисунках означают дискретность экстраполяции магнитного поля данных для s -соответствующих гармоник гирорезонансного из радиочастот.

По результатам совместных наблюдений было показано, что реконструированное нелинейное бессиловое магнитное поле лучше соответствует наблюдениям, чем потенциальная модель. При этом высоты радиоисточников располагаются выше.

Gelu M. Nita¹, Gregory D. Fleishman¹, Ju Jing, Sergey V. Lesovoi, Vladimir M. Bogod, Leonid V. Yasnov, Haimin Wang and Dale E. Gary : Three-dimensional structure of microwave sources from solar rotation stereoscopy versus magnetic extrapolations, 2011, *Astrophysical J.*, 737, 82.

1.16. О разработке экспериментально- модельного подхода в измерениях 3-D структуры солнечной атмосферы в активной области (САО, СПбУ)

В разработке находится перспективный метод, свободный от возможных ошибок, присущим стереоскопическому методу из-за суточной нестабильности активной области. Он, конечно, не дает столь полной информации о магнитном поле как стереоскопический метод, но позволяет достоверно судить о различии реконструированного и реального магнитного поля. Этот метод основан на сравнительном анализе пространственной структуры реконструированного магнитного поля и пространственной структуры радиоизлучения активной области. Такие методы, основанные на модельных расчетах циклотронного излучения в приложении к реальным наблюдениям на РАТАН-600, требуют корректной экстраполяции фотосферного магнитного поля в корону. В последние годы в этой области появился существенный прогресс ввиду использования модели нелинейного бессилового магнитного поля (NLFFF). При этом также используются современные данные о фотосферном векторном магнитном поле, получаемые на SDO (solar dynamic observatory). Далее проводится расчет радиоизлучения в выбранном кубе данных, в основании которого лежит магнитная структура активной области на фотосфере. Рассчитанная радиокарта на ряде радиочастот проходит процедуру свертки с одномерной диаграммой РАТАН-600 для соответствующих частот. Полученные сканы сопоставляются со сканами реальных наблюдений и являются основой для изучения особенностей циклотронного излучения активных областей. На рис.1 представлены рассчитанные двумерные карты яркостной температуры для АО 10933 для трех длин волн 2.0 см, 3.5 см и 5.0 см для полной интенсивности (слева), обыкновенной волны (в центре) и необыкновенной волны (справа).

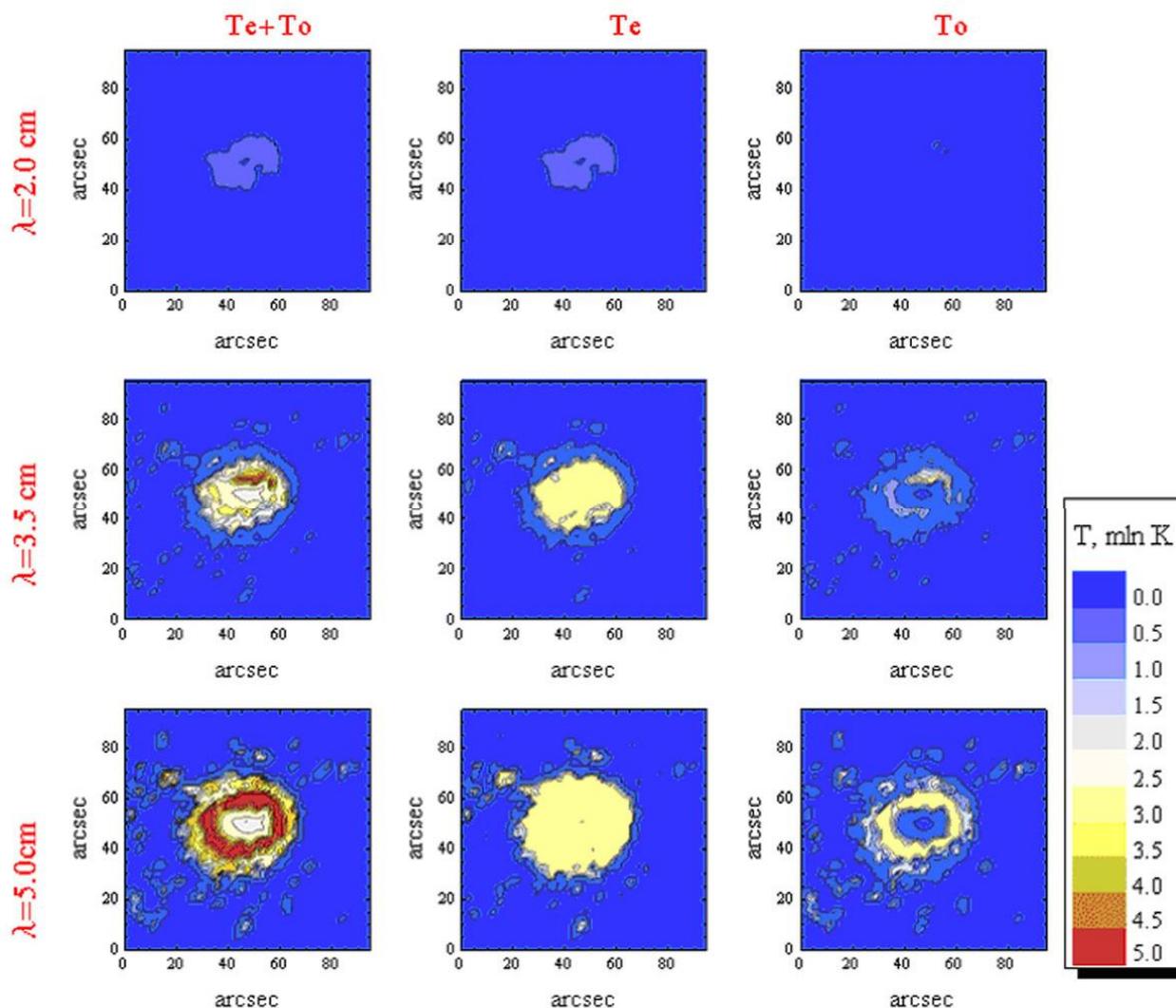


Рис.1 Рассчитанные двумерные карты яркостной температуры для АО 10933. Вверху, Для волны 2.0см, карты для полной интенсивности (слева), обыкновенной волны (в центре) и необыкновенной волны (справа). В центре то же для волны 3.5 см, Внизу - то же для волны 5.0 см

Характеристики моделируемого радиоизлучения сравниваются с наблюдательными данными РАТАН-600: одномерные сканы на разных длинах волн микроволнового диапазона, спектры полного и поляризованного потока, размеры источников и яркостные температуры, степени поляризации. Анализируются пространственные и спектральные характеристики поляризованного излучения. Детальное соответствие с модельными и наблюдательными данными достигается через корректную подгонку параметров модели. Эта процедура позволяет оценить значения электронной плотности и температуры плазмы. Модельные расчеты предоставляют собой определенный инструмент для получения более значения эффективной высоты излучения и формирования тонкой структуры распределения яркостной температуры по активной области.

На рис.2 представлены рассчитанные эффективные высоты для радиоисточника над головным пятном АО 10933 с использованием правой и левой круговых поляризаций.

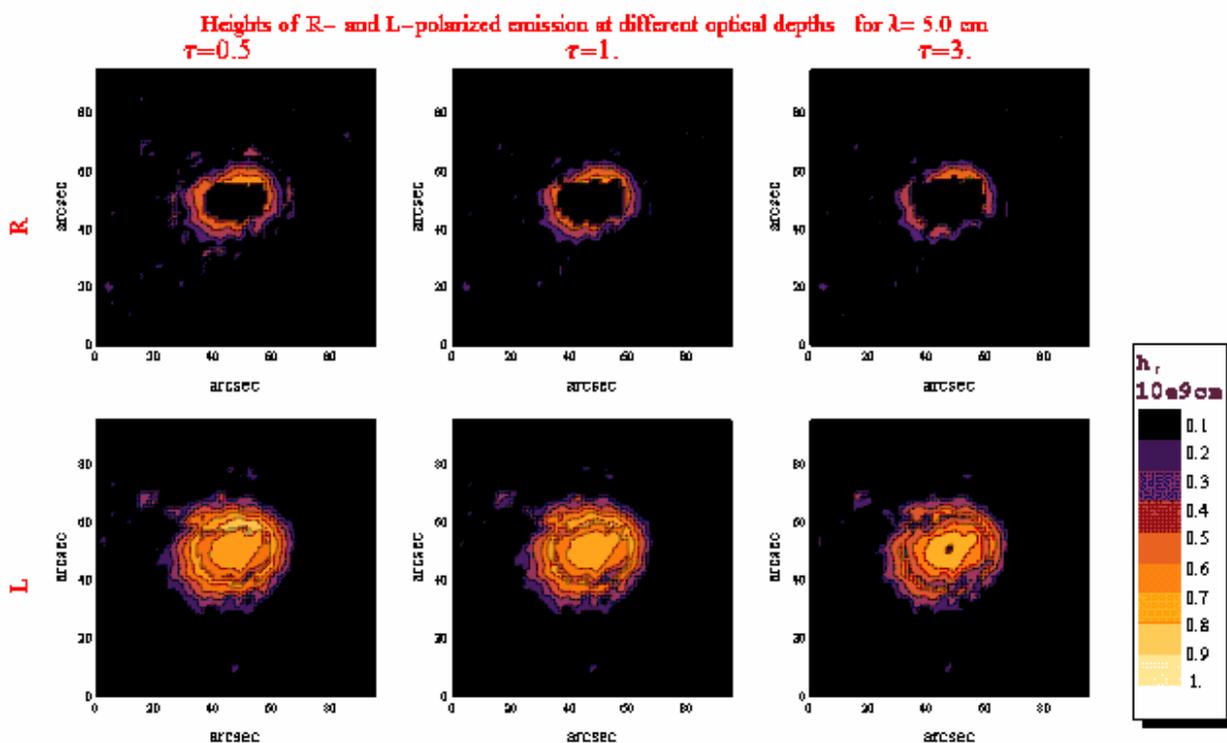


Рис. 2. Вычисленные эффективные высоты для пятенного радиоисточника АО 10933 для поляризованного излучения. Вверху для правой круговой поляризации, что соответствует обыкновенной моде излучения, внизу- для левой круговой поляризации или для необыкновенной моде.

Из рис.2 следует резкое различие формы высотного профиля радиоисточников для обыкновенной оды в виде перевернутого конуса и для необыкновенной волны в виде нормального конуса с максимумом яркостной температуры в его вершине.

L. V. Yasnov, T. I. Kaltman, V. M. Bogod: Unusual Spectra of Polarized Radio Emission of Active Regions on the Sun, in Planetary Radio Emissions VII, edited by H.O. Rucker, W.S. Kurth, P. Louarn, and G. Fischer, Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, 427-433, 2011.

Богод В.М., Кальтман Т.И., Ступишин А.Г., Яснов Л.В. О высотной структуре корональных магнитных полей, АЖ (в печати).

1.17. Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы (ИЗМИРАН, ГАО)

1.17.1. Построена новая теоретическая модель корональной дыры (КД), магнитное поле которой складывается из открытого магнитного потока и потока, замкнутого на окружающую КД хромосферу. Получены простые аналитические формулы, описывающие понижение температуры и плотности в КД. Показано, что эффект понижения яркости КД критическим образом зависит от соотношения поперечного размера дыры R_{CH} и шкалы высоты $H(T)$ в окружающей короне. Для больших КД, $R_{CH} \gg H(T)$, плотность газа в КД близка к корональной и понижение яркости КД обусловлено только ее более низкой температурой. В среднем, когда $R_{CH} \approx (1.5 \div 2)H(T)$, плотность и температура в КД примерно вдвое ниже их корональных значений на том же геометрическом уровне. В другом предельном случае, когда $R_{CH} \approx H(T)$, температура газа в КД равна T короны или даже несколько выше, но зато плотность плазмы в КД оказывается в несколько раз меньше корональной. Обоснована аналогия между строением КД и структурой солнечного пятна.

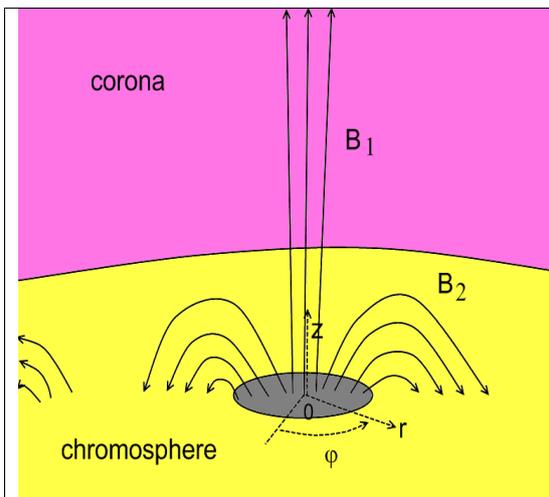


Рис.1. а. Качественный вид аксиально-симметричной магнитной конфигурации КД, описываемой суммой двух полей: открытого \mathbf{B}_1 и замкнутого на окружающую хромосферу \mathbf{B}_2 . Пунктиром отмечена цилиндрическая система координат r, φ, z .

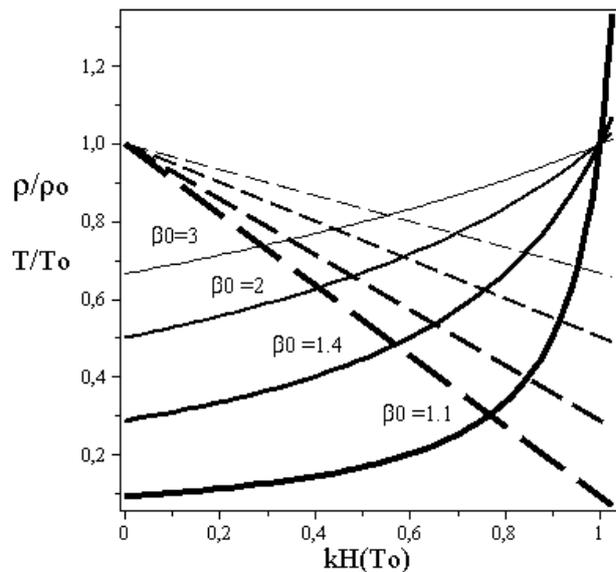
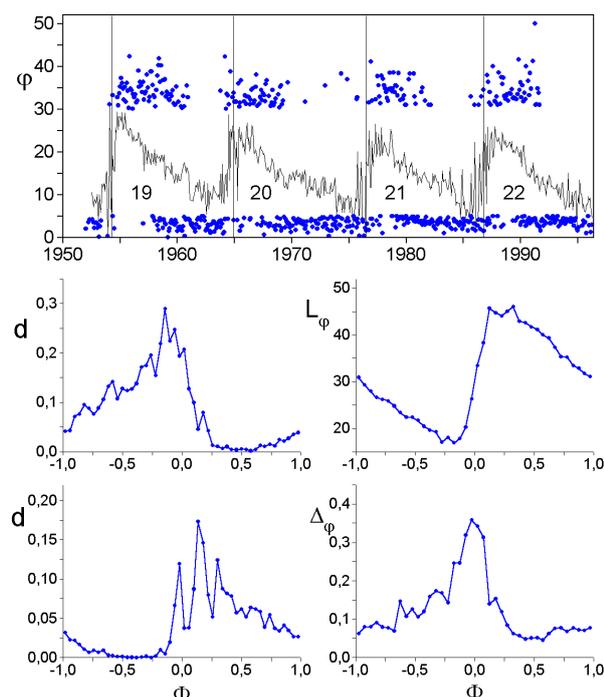


Рис.1.б. Зависимость относительной температуры $T(z)/T_0(z)$ (сплошные линии) и плотности газа $\rho(z)/\rho_0(z)$ (пунктирные линии) на некоторой фиксированной высоте в КД от величины $kH(T_0) \equiv H(T_0)/R_{CH}$ при различных значениях плазменного параметра $\beta_0(z)$. Наиболее толстые линии соответствуют значению $\beta_0 = 1.1$, наиболее тонкие – значению $\beta_0 = 3$.

В.Н Обридко, А.А. Соловьев. «Магнитогидростатическая модель корональной дыры». *Астрономический Журнал* (2011), т. 88, №12, с.1238-1248.

1.17.2. Предложены несколько параметров, характеризующих широтное распределение центров пятнообразования - нормированная и ненормированная северо-южная асимметрия и расстояние между среднемесячными широтами групп пятен в северном и южном полушариях (текущий размах крыльев бабочек Маундера). Асимметрия широт центров пятнообразования сопоставлена с асимметрией суммарных площадей и полного числа групп пятен; такое сопоставление проведено как на масштабах 11-летнего цикла, так и на больших временных масштабах. Показано, что абсолютная северо-южная асимметрия центров пятнообразования достигает максимальных значений вблизи минимумов циклов активности. В это же время максимальных значений достигает абсолютная асимметрия суммарных площадей групп пятен и их полного числа. Предложен общий сценарий развития пятнообразовательной деятельности в цикле солнечной активности. Северо-южную асимметрию можно интерпретировать как разбалансировку в работе двух полушарий. Наблюдаемая разбалансировка наиболее выражена в минимумах циклов, при постепенном переходе от одного цикла к другому, когда абсолютные значения асимметрии суммарных площадей пятен и их широт достигают наибольших значений. В рамках современных динамо-теорий существенным является вопрос о том, насколько синхронизованы процессы, происходящие в северном и южном полушарии. Результаты выполненной работы выявляют определенные различия в работе двух полушарий. Мерой этого различия является северо-южная асимметрия. Можно полагать, что асимметрия суммарных площадей групп пятен (разбалансировка работе полушарий по мощности) и асимметрия широтного положения центров пятнообразования (пространственная разбалансировка) свидетельствуют о различии

характеристик активности в двух полушариях в ходе 11-летнего и векового циклов активности.



Верхняя кривая – широты центров пятнообразования для четырех циклов в северном полушарии, указаны номера циклов. Точками показано положение высокоширотных (30 – 40 градусов) и низкоширотных (0 – 5 градусов) групп пятен. Далее, левая колонка – доля низкоширотных (вверху) и высокоширотных (внизу) групп пятен по отношению к их общему числу; правая колонка – средний размах крыльев бабочки (вверху) и нормированная абсолютная асимметрия широт пятен (внизу), все в зависимости от фазы цикла.

Бадалян О.Г., Астрон. журн., 2011, т. 86, с. 1008–1023.

1.17.3. Показано, что в течение 23-го солнечного цикла (1996-2009 гг.) изменения максимальной скорости КВМ коррелируют с изменениями крупномасштабной структуры магнитного поля Солнца (изменениями индекса эффективного солнечного мультиполя n). При этом в отличие от средних значений скорости КВМ значениям максимальной скорости КВМ соответствуют максимальные значения индекса эффективного мультиполя.

Отв.: Обридко В.Н., Иванов Е.В.

1.18. Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы (ИПФ)

Рассмотрена пространственная структура квазистационарного электромагнитного поля накачки, формирующего за счет диамагнитного эффекта новые дисперсионные свойства звуковых волн при гиперзвуковом обтекании тела фоновой плазмой. Электромагнитная накачка обусловлена источником намагниченности, размещенным на теле. Получены новые размерные и безразмерные параметры кинетической природы для характеристик распределения поля накачки в фоновой плазме, выраженные через газодинамические параметры и форму функции распределения частиц разреженной плазмы.

Решение задачи о подавлении ударных волн, возникающих при гиперзвуковом движении, тел и задачи изменения аэродинамических характеристик таких тел связывается в плазменной аэродинамике с созданием плазменных оболочек и плазменных потоков, которые позволяют включить в аэродинамическое рассмотрение не только

поверхностные, но также и объемные силы. При этом эффективное число Маха, характеризующее отношение скорости объекта к скорости звука в окружающей объект среде, может меняться относительно числа Маха, определенного по скорости звука вдали от тела.

Традиционное направление исследований в гиперзвуковой магнитоплазменной аэродинамике, сводится к созданию условий для уменьшения эффективного числа Маха в области нахождения тела до скоростей, соответствующих дозвуковому движению без ударных волн. Нами предложено новое направление по решению проблемы подавления ударных волн при гиперзвуковых движениях. Оно связано с увеличением эффективного числа Маха, посредством уменьшения скорости звука в окружающей тело среде и созданием в предельном случае режима акустической непрозрачности окружающей тело среды. Непрозрачность препятствует излучению акустических волн телом, следовательно, не происходит формирование ударной волны, как сильного акустического возмущения. Создание плазменной оболочки со свойствами непрозрачности по отношению к звуковым волнам в некотором диапазоне частот и соответствующем диапазоне волновых чисел звуковых мод, рассматриваемых здесь по отношению к электромагнитной волне накачки как сигнальные волны, возможно методом нелинейного комбинационного воздействия на среду электромагнитными силами Ампера. Это достигается на удвоенной частоте с учетом частотного сдвига из-за движения посредством работы волнового источника намагниченности, установленного на теле. Силы Ампера формируют «волну накачки» в плазме.

Решение проблемы подавления ударных волн состоит из трех этапов:

1. решение нелинейной задачи о возможности формирования электромагнитно индуцированной акустической непрозрачности плазмы посредством движущейся сверхзвуковой намагниченностью;
2. решение линейной задачи о структуре акустических полей и пространственно неоднородных оболочек – «плащей» из акустически непрозрачной среды для обеспечения безизлучательных режимов гиперзвукового движения;
3. изучение структуры электромагнитного поля накачки вблизи намагниченного тела, движущегося с гиперзвуковой скоростью и окруженного разреженной плазмой.

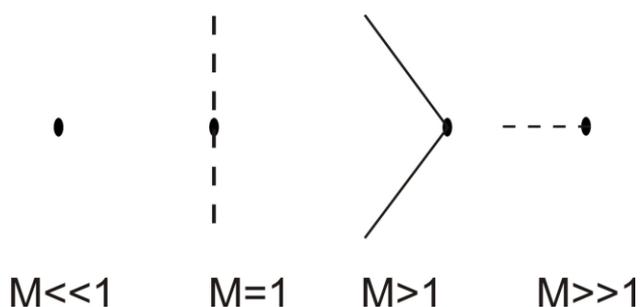


Рис. 1: Топологическая реконфигурация акустической (неэлектромагнитной) части поля, возбужденного плазменным потоком около намагниченного тела, при различных значениях числа Маха

В данной работе рассмотрен третий этап проблемы. Исследовано пространственное распределение квазистационарного электромагнитного поля накачки в окружающей движущее тело сильно разреженной плазме, представляющее собой тонкоструктурный след резистивной или диамагнитной природы в зависимости от параметров окружающей плазмы. Кинетическое рассмотрение сильно разреженной плазмы важно при рассмотрении задачи торможения спутников и спускаемых аппаратов, находящихся на баллистических орбитах.

Получены размерные и безразмерные линейные и нелинейные параметры для пространственных характеристик поля накачки в плазме.

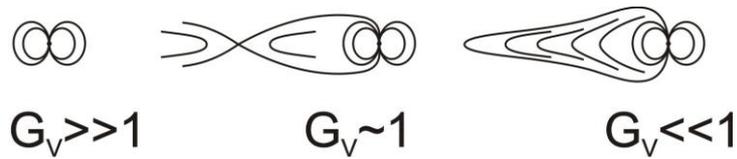


Рис. 2: Топологическая реконфигурация электромагнитной) части поля, возбужденного плазменным потоком около намагниченного тела, при различных значениях параметра электромагнитной добротности потока G_v

Эти параметры выражены через газодинамические характеристики плазмы, а также и через форму функции распределения потока частиц разреженной плазмы набегающей на тело. Это аномальный скиновый масштаб и диамагнитный скиновый масштаб, входящие в определение масштаба лучевых электромагнитных структур, формируемых в поле накачки. Введен безразмерный параметр электромагнитной добротности потока отличный от числа Маха, характеризующего акустические поля. Ведены нелинейные диамагнитные и резистивные параметры, характеризующие переходы из намагниченного движения частиц непосредственно вблизи тела в немагнитное вдали от него. Добротность характеризует вес возбуждаемых диамагнитных токов по отношению к резистивным токам, определяется только через форму функции распределения частиц потока. Добротность в своих предельных значениях характеризует поток плазмы на тело как резистивную либо как диамагнитную среду. Установлена природа топологической перестройки поля накачки из резистивного состояния к диполизированному состоянию. Топологическая перестройка определяется неадиабатическим изменением значения параметра электромагнитной добротности потока при перестройке формы функции распределения частиц.

Губченко В.М. О кинетическом описании крупномасштабных токнесущих электромагнитных структур, возбуждаемых в движущейся горячей бесстолкновительной плазме // Труды международной конференции «XII Харитоновские тематические научные чтения», РФЯЦ-ВНИИЭФ, апрель 19-23, 2010 г., г. Саров, Россия, с. 239-246, ISBN 978-5-9515-0151-6.

Gubchenko V.M. On electromagnetic field structure near the magnetized body and action on it by reshaping of the particle distribution function of the incoming supersonic collisionless plasma flow // Proc of the 42nd American Institute of Aeronautic and Astronautics (AIAA) Plasma dynamics and Laser Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion, 27-30 June 2011, Hawaii, Sheraton Waikiki and Hawaii Conventional Center, Honolulu, Hawaii. Technical paper AIAA 2011-3742, pp. 1-13.

Gubchenko V.M. О гиперзвуковом потоке разреженной горячей плазмы с высоким бета, формирующим электромагнитные структуры около намагниченных тел и управляющие параметры, определяемые формой функции распределения частиц потока // Proc 10th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, March 22-24, 2011, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia, с. 130-131, ISBN 5-201-09558-5.

1.19. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений (ИПФ)

1.19.1. Анализ низкочастотной модуляции микроволнового излучения корональных магнитных петель показал, что вспышечному процессу предшествует существенное (в несколько раз) нарастание электрического тока в магнитной петле. Показано, что причина увеличения электрического тока перед вспышкой может заключаться в развитии баллонной моды желобковой неустойчивости в основании корональной магнитной петли, что в данном случае играет роль триггера вспышки, либо под действием осцилляций скорости фотосферной конвекции. Индукционные электрические поля могут являться

причиной ускорения частиц в звездных коронах до и появления высокой (до 10 К) яркостной температуры медленно меняющейся компоненты их радиоизлучения.

Зайцев В.В., Кислякова К.Г., Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С. Об эффекте сильного возрастания электрического тока в корональных магнитных петлях во время солнечных вспышек // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2010», Санкт-Петербург, 2010, стр. 15-19.

Зайцев В.В., Кислякова К.Г., Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С. Необычная предвспышечная модуляция микроволнового излучения в корональных магнитных петлях // Известия вузов. Радиофизика, 2011, том 54, с. 243-259.

1.19.2. На примере более 40 событий, наблюдавшихся в 2001 г. в Обсерватории Метсахови, исследованы модуляции микроволнового излучения Солнца на частоте 11.7 ГГц. Практически во всех наблюдавшихся событиях обнаружены низкочастотные модуляции с периодами 3–90 мин. Как правило, наблюдается одновременная модуляция излучения несколькими частотами. Возможной причиной возникновения модуляций с периодами 5–10 мин может являться параметрический резонанс, возникающий в корональных магнитных петлях в результате взаимодействия с 5-мин фотосферными осцилляциями, в то время как долгопериодические модуляции могут быть проявлениями колебаний солнечных пятен. Подходящими периодами обладают крутильные (θ -мода) и радиальные (r -мода) осцилляции. Рассмотрена частота появления колебаний определенных периодов, а также проведена оценка нижней границы яркостной температуры осцилляций.

Зайцев В.В., Кислякова К.Г., Урпо С., Риехокайнен А. Долгопериодические осцилляции микроволнового излучения Солнца // Астрон. ж. 2011. Т. 88, №3. С. 303–312.

1.19.3. Продемонстрирована возможность восстановления параметров источника зебраструктуры по наблюдаемым параметрам осцилляторной структуры динамического спектра. Показано, что в рамках модели двойного плазменного резонанса осцилляторное изменение частоты зебра-полос может быть связано с БМЗ колебаниями силовой трубки, которые приводят к колебаниям величины магнитного поля и электронной концентрации в источнике.

Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H. Radio diagnostic of loop oscillations with wavy zebra patterns // Central Europ. Astrophys. Bull. 2011. V.36, P. 161-170.

Злотник Е.Я., Зайцев В.В., Аураас Г. Диагностика колебаний магнитных силовых трубок на Солнце по характеристикам тонкой структуры спектра радиоизлучения // Письма в АЖ, 2011. Т. 37, №7. С. 555-560.

1.19.4. Решена задача о нахождении компонент тензора удельного сопротивления плазмы в условиях, характерных для корон Солнца и звезд поздних спектральных классов, получены аппроксимационные формулы. Показано, что в короне могут реализовываться два режима диссипации тока, текущего поперёк магнитного поля: диссипация за счёт трения ионной и нейтральной компонент плазмы (проводимость Каулинга) и диссипация за счёт трения двух различных ионных компонент. Первый режим реализуется в большей части нижней короны, условие для реализации второго режима может удовлетворяться в основании солнечной короны или в корональных стримерах. Во втором режиме скорость диссипации поперечного тока увеличивается на порядок по сравнению с водородной плазмой. Холловская и продольная компоненты тензора удельного сопротивления слабо отличаются от их значений для электрон-протонной плазмы. Обращено внимание на то, что при трении нейтральных и ионизованных атомов водорода, помимо обмена импульсом в результате перезарядки, заметную роль играет обмен импульсом за счёт ионизации и рекомбинации при столкновениях с электронами.

Круглов А.А. Электрические токи в корональных магнитных петлях // Известия высш.уч.зав. Радиофизика. 2011. Т.54, № 1. С. 26-40.

1.20. Исследование квазистационарных источников солнечного ветра и анализ динамических процессов в солнечной короне по наблюдениям солнечной короны в рентгеновском и ВУФ-диапазонах спектра (ФИАН, ИЗМИРАН, МИФИ, НИИЯФ МГУ)

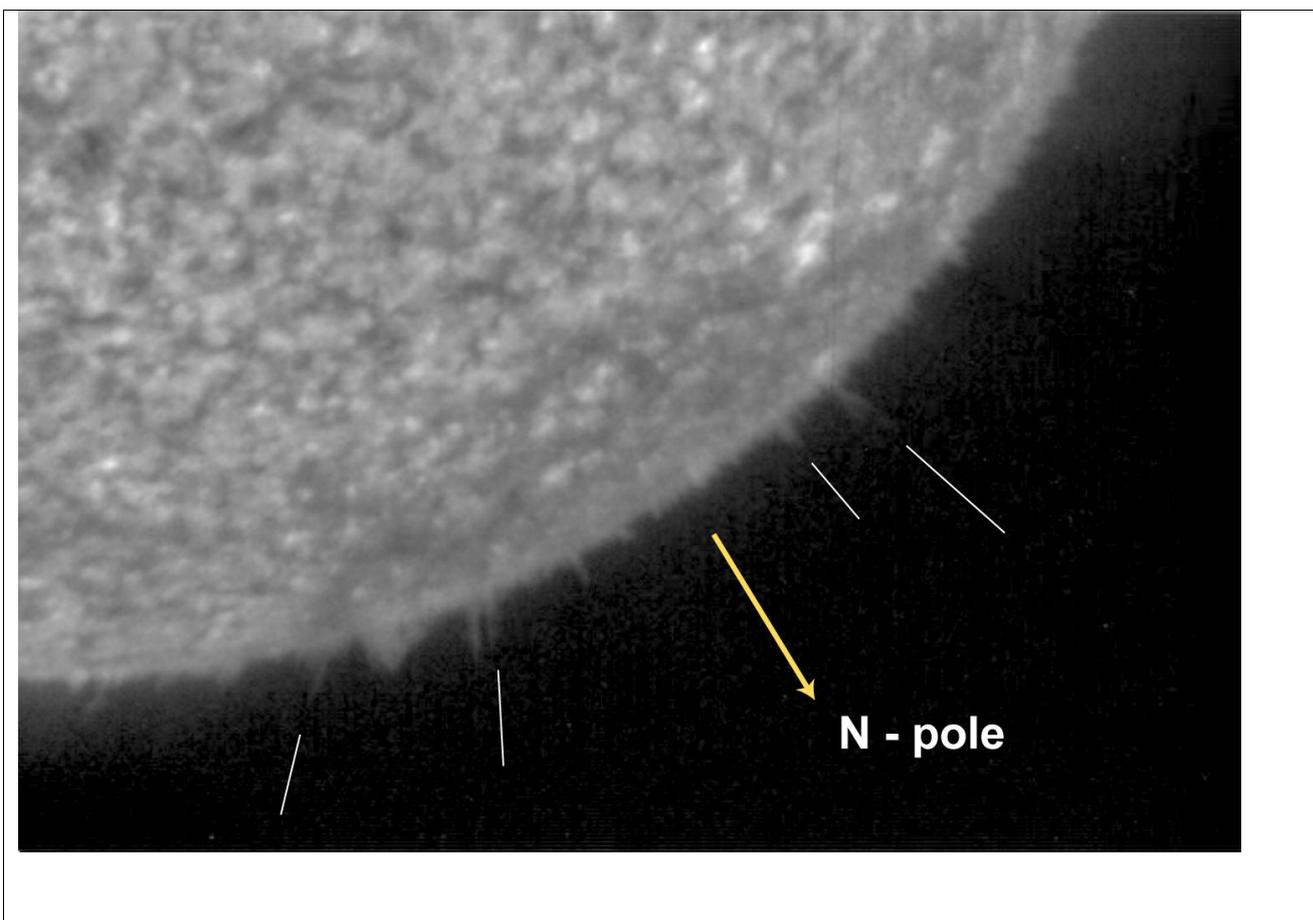
В ходе космического эксперимента ТЕСИС (ФИАН) на спутнике КОРОНАС-Фотон в 2009 году было проведено исследование движений плазмы внутри солнечных макроспикул. Макроспикулами называются нитевидные образования на краю солнечного диска, образующиеся в результате подъема относительно холодной и плотной плазмы из нижних слоев солнечной атмосферы вверх в корону Солнца на высоты от 10 тысяч км и выше. Исследования спикул (и макроспикул) крайне важны с точки зрения физики солнечной короны, т.к. они считаются одним из основных каналов импорта вещества из фотосферы в корону. Характерное время жизни макроспикулы (время подъема и последующего опускания вещества) составляет обычно несколько минут, а характерные размеры лежат в диапазоне от нескольких угловых секунд до десятков секунд. Все это создает значительные трудности для их экспериментального исследования. По этой причине в настоящее время известны лишь средние времена жизни спикул (обычно 3-10 минут), а также усредненные скорости вещества в них, около 50-100 км/сек, получаемые, как правило, делением удвоенной высоты спикулы на время ее жизни.

Макроспикулы регистрировались в телескопическом канале прибора ТЕСИС в линии HeII, длина волны 304А, что соответствует относительно холодной плазме переходного слоя (рис.1). Полученные в эксперименте данные характеризуются, в первую очередь рекордным временным разрешением, что позволило детально исследовать динамику макроспикул на разных стадиях развития.

Для получения более детальной информации о движении плазмы в спикулах в 2009-2011 годах была разработана модель, основанная на решении системы уравнений движения вещества внутри спикулы в одномерном приближении. Исходными данными для моделирования являлись экспериментальные данные о распределении плотности плазмы вдоль направления движения спикулы, получаемые из измерения поверхностной яркости спикулы в линии HeII 304 А в приближении оптически толстой плазмы. Такой подход позволяет рассчитать в абсолютных величинах мгновенную скорость плазмы внутри спикулы, причем на всех высотах одновременно. Дифференцирование скорости по времени, соответственно, позволяет найти ускорение плазмы.

Описанным выше методом было обработано около 20 макроспикул, для которых было установлено следующее. Подъем плазмы в корону начинается с быстрого ускорения, продолжающегося менее минуты, в течение которого вещество достигает скорости около 100-200 км/сек. После этого плазма движется вверх в корону против сил гравитации, постепенно замедляясь до скорости, равной нулю. Обращение скорости в ноль происходит практически одновременно вдоль всей длины спикулы. Заключительной стадией жизни спикулы является падение вещества обратно к поверхности Солнца с ускорением до 100-200 км/сек.

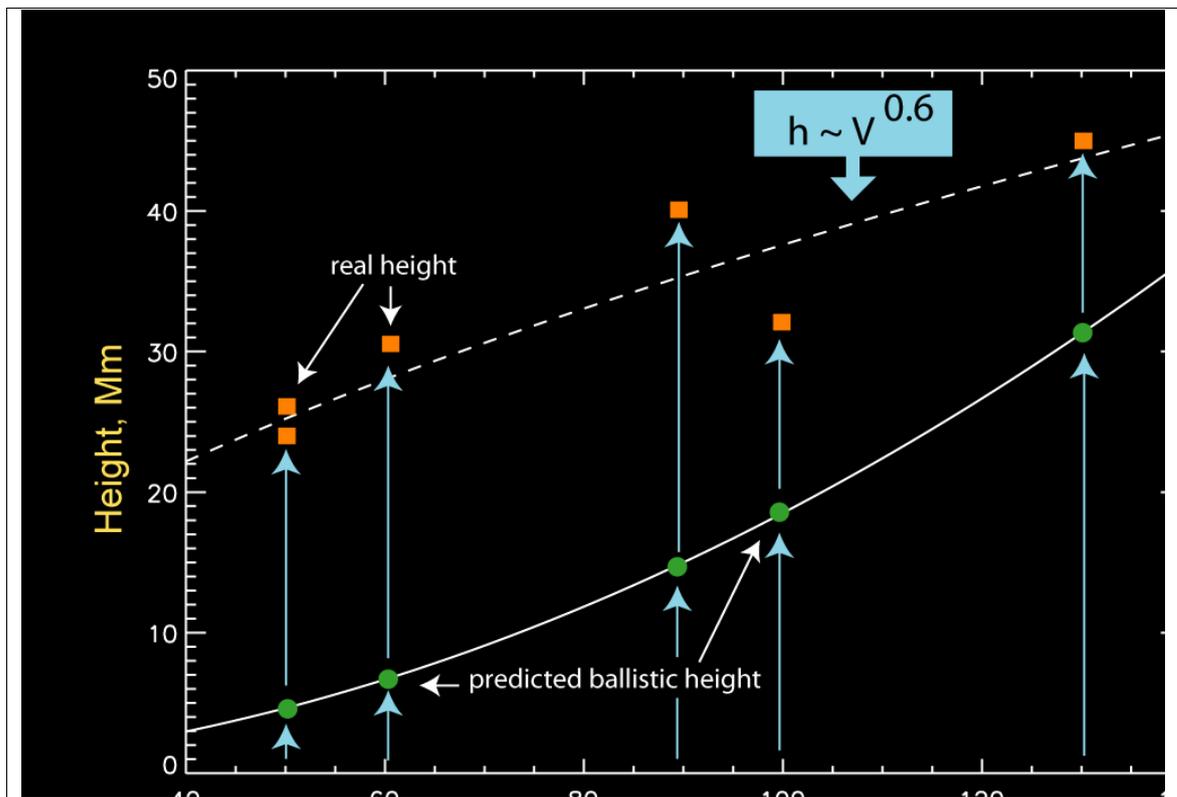
Рис. 1: Пример наблюдения макроспикул в эксперименте ТЕСИС (ФИАН) на спутнике КОРОНАС-Фотон. Изображение получено в линии гелия HeII 304 А. Белые линии показывают направление подъема спикулы, использованное в одномерном моделировании. Желтая стрелка показывает положение и направление северной полярной оси Солнца.



Помимо измерения скорости плазмы в спикулах в ходе исследования ставился вопрос о том, является ли движение вещества после первоначального ускорения свободным (строго баллистическим) или оно происходит с дополнительным ускорением или торможением. Для ответа на это вопрос измеряемое ускорение плазмы в спикулах сравнивалось с ускорением свободного падения на соответствующих высотах. Во всех случаях было зарегистрировано значительное (до 50% от ускорения свободного падения) отклонение движения спикулы от баллистического, что было интерпретировано как дополнительная движущая сила (рис. 2). Направление этой силы во всех случаях следующее: от поверхности Солнца вверх в корону. Таким образом, плазма внутри спикулы испытывает дополнительное ускорение во время подъема вещества и замедляется на стадии падения.

Косвенным подтверждением наличия движущей силы должно являться превышение фактической высоты, которой достигает плазма в короне, по сравнению с расчетной высотой на основе измеряемой начальной скорости спикулы. В результате такой проверки показано, что во всех случаях фактическая максимальная высота спикулы в 1.5-2 раза превышает баллистическую высоту.

Рис. 2: Сравнение баллистической и фактической высот, достигаемых плазмой внутри солнечных макроспикул.



Используя данные космических наблюдений Солнца в эксперименте ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон в диапазоне 171А (линия FeIX, температура 0.8МК), было проведено широкомасштабное исследование временных профилей и полной энергии более чем 2000 солнечных нановспышек – событий с энерговыделением от 10^{24} до 10^{26} эрг, составляющим от 10^{-9} до 10^{-7} от типичной энергии большой солнечной вспышки (рис.3). Ранее в результате исследований других авторов было довольно уверенно определено распределение вспышек по энергиям в диапазоне выше 10^{27} эрг.

Рис. 3: Пример наблюдения солнечной нановспышки. Панели (a), (b) и (c) – изображение вспышки в разные моменты времени. График – временной профиль вспышки.

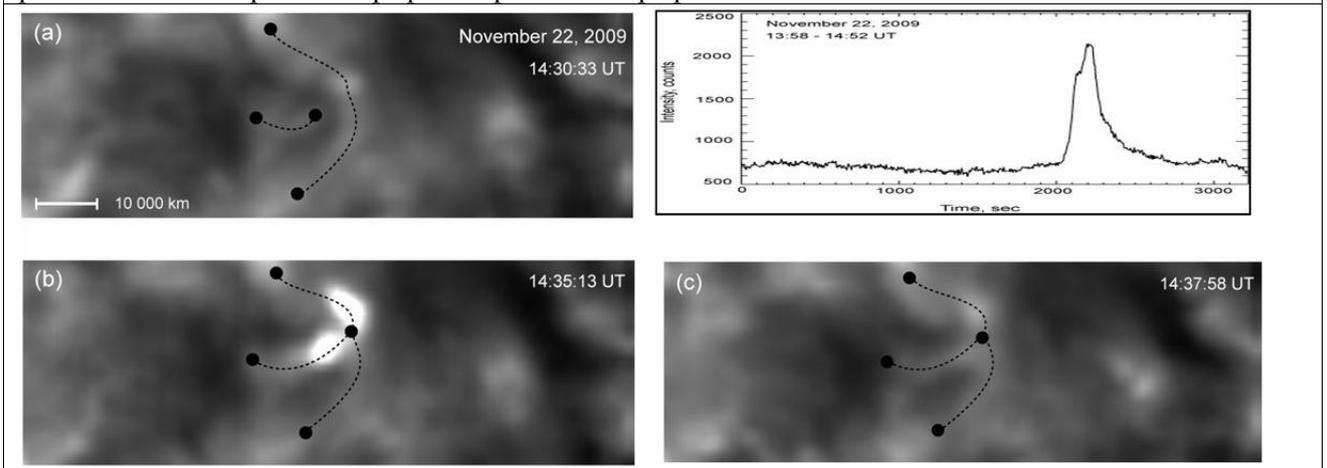
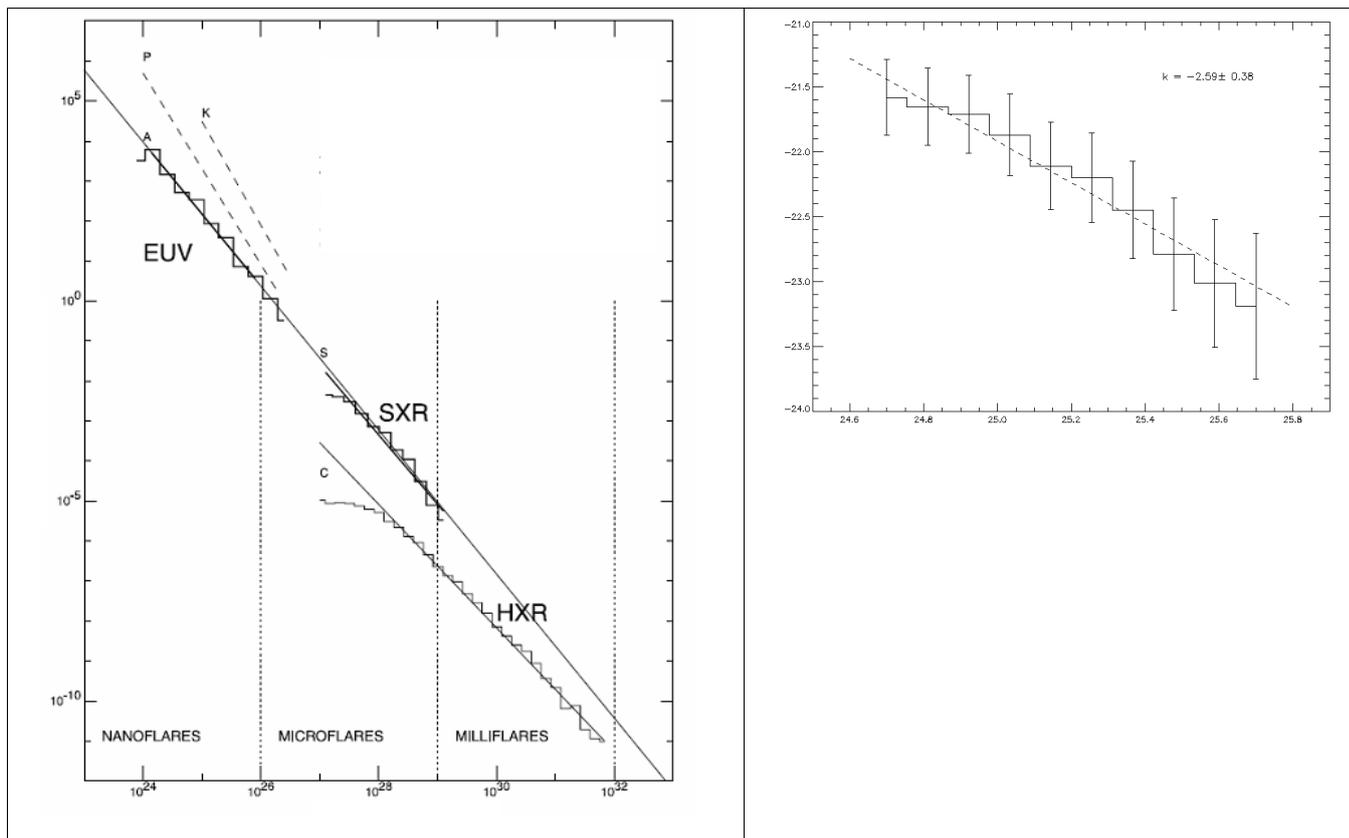


Рис. 4: Распределение по энергиям солнечных вспышек в диапазоне $10^{24} - 10^{32}$ эрг по данным других авторов (слева) и результаты проведенного исследования – распределение по энергиям в диапазоне $10^{24} - 10^{26}$ эрг.



Было показано, что это распределение является степенным, то есть подчиняется закону $dN \sim E^{-\phi} dE$, и имеет наклон $\phi \approx 1.6$. В области энергий ниже 10^{26} эрг, где высвобождают свою энергию нановспышки, наклон распределения также был ранее измерен, но значительно менее уверенно. До текущего момента существовало как минимум три оценки ϕ : 1.79 ± 0.08 (Aschwanden et al., 1999), $2.42-2.59$ (Parnell & Jupp, 1999) и $2.53-2.59$ (Krucker & Benz, 1998) (рис. 4, левая врезка). Различие между этими оценками, хотя и кажется незначительным, является принципиальным, так как при ϕ меньше 2 суммарная энергия, высвобождаемая в нановспышках, получается меньше, чем в крупных событиях, а при $\phi > 2$, напротив, превышает ее. Источником прежней неопределенности ϕ в области энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг было то, что события в этом диапазоне являются предельно слабыми и регистрируются на пределе чувствительности. Также можно отметить низкое временное распределение прежних наблюдений, порядка минуты, которое приводило к тому, что значительная часть событий оказывалась пропущенной. Особенностью проведенного исследования помимо большого числа событий стал период наблюдений, совпавший с глубоким минимумом солнечной активности. Это позволило на фоне чрезвычайно спокойной короны Солнца с высокой точностью измерить энергию наиболее слабых событий с энергией в диапазоне от 10^{24} до 10^{25} эрг. Второй особенностью стало рекордное временное разрешение наблюдений, около 4 секунд, что более чем в 10 раз превышает обычное разрешение в этом диапазоне (спутники SOHO, TRACE). В совокупности это позволило провести наиболее точное на настоящий момент исследование энергетического распределения нановспышек и получить следующие выводы: (1) распределение нановспышек в диапазоне энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг, действительно, является степенным с наклоном близким к двум; (2) точное значение наклона находится в области $\phi > 2$ и по нашим оценкам составляет 2.6 (рис.4, правая врезка). Основным выводом исследования состоит в том, что основная вспышечная энергия Солнца заключена в области энергий ниже 10^{27} эрг, то есть в нановспышках. Также было показано, что в диапазоне энергий $10^{24} - 10^{26}$ эрг не наблюдается «обрывание» спектра, которое необходимо для того, чтобы

суммарная вспышечная энергия Солнца не была бесконечной. По всей вероятности точка перелома спектра находится в области энергий ниже 10^{24} эрг.

A.Reva,S.Shestov,S.Bogachev,S.Kuzin.S.Kuzin Investigation of hot X-Ray Points (HXP) Using Spectrogoniograph Ng XII Experiment Data from CORONAS-F/SPIRIT. Solar Phys 2011. DOI 10.1007/s11207-011-9883-6

В. А. Слемзин. Фотометрия солнечного ВУФ-излучения с помощью космических телескопов с многослойной оптикой нормального падения. ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2011, том 75, № 1, с. 95–100.

V.D. Kuznetsov , I.I. Sobelman, I.A. Zhitnik , S.V. Kuzin , Yu.D. Kotov, Yu.E. Charikov, S.N. Kuznetsov, E.P. Mazets, A.A. Nusinov ,A.M. Pankov , J. Sylwester Results of solar observations by the CORONAS-F payload, Advances in Space Research 47 (2011),pp 1538–1543

B. Sylwester, J. Sylwester, M. Siarkowski, A.J. Engell and S. V. Kuzin, Physical Characteristics of AR 11024 Plasma based on SphinX and XRT data, Central European Astrophysical Bulletin, p. 171-180

1.21. Динамика магнитных трубок и движения вещества в формирующейся активной области (ИСЗФ СО РАН)

По материалам SOHO/MDI исследовалась динамика всплывающих магнитных трубок в процессе появления мощной, гелиоэффективной области NOAA 10488. Анализировались магнитограммы продольного магнитного поля и данные о лучевых скоростях, полученные с временным разрешением 1 мин. Рассмотрение начато за 6 часов до начала выхода в фотосферу магнитного потока новой активной области и закончено спустя 2.5 суток, когда полностью завершилось формирование головного пятна. На ранней стадии возникновения активной области картина замыкания силовых линий магнитного поля определялась с помощью структуры лучевых скоростей по наличию областей повышенных значений отрицательной лучевой скорости на границе появляющихся участков продольного магнитного поля противоположных полярностей. В условиях вмерзности магнитного поля такую картину можно интерпретировать как подъём горизонтального поля, соединяющего эти участки, т.е. как прохождение через фотосферу вершины петлеобразной трубки магнитного поля. Исследованы такие параметры, как динамика скорости подъёма магнитных петель, концентрация магнитного поля, приведшая к образованию головного пятна, динамика магнитного поля в образующейся полутени, образование moat-ячейки вокруг головного пятна.

Установлено, что смена знака фонового магнитного поля произошла за 2-4 час до начала выхода магнитного поля активной области. Образование АО в фотосфере началось с появления локальной области подъёма, в течение 20 мин. скорость подъёма достигла 2 км/с, после чего снизилась. В дальнейшем скорость подъёма магнитных петель достигала 1 км/с. Первоначально всплывающие трубки магнитного потока были повернуты ~ на 90 градусов против часовой стрелки. Образование головного пятна началось спустя 2 часа, с выходом петли магнитного поля размером 10 дуг. сек., ориентированной в соответствии с правилом Хэла. В её ведущем конце спустя менее 2 часов, возникла головная пора. С самого начала вплоть до образования поры поток выходил в этом месте в сконцентрированном виде. В дальнейшем выход магнитного потока новой активной области происходил по площади в несколько супергранул. Концентрация магнитного поля в формирующееся пятно происходила в виде направленного движения магнитных структур по дугообразным траекториям, в 2-3 раза превышающим радиус супергранул, что исключает возможность участия последних в концентрации магнитного потока. Наблюдаемая картина объясняется выходом на поверхность ведущего основания всплывающей Ω -трубки. Выход нового магнитного потока продолжался в течение всего периода формирования пятна, составившего более двух суток, при этом места выхода приближались к области формирующегося пятна и скорость подъёма магнитных петель замедлялась. Параллельно с продолжением выхода магнитного потока в области пятна с

внутренней стороны активной области, с внешней стороны её происходят процессы, завершающие формирование пятна: возникает развитая полутьнь, начинается эффект Эвершеда, образуется moat путём отделения периферийных участков магнитного поля. Образование moat не может быть вызвано действием гранулярной конвекции и эвершедовских течений, поскольку последние имеют меньшие пространственные масштабы. Существует высокая динамичность магнитного поля в полутени и ближайшей окрестности, что говорит в пользу моделей последовательно всплывающих трубок поля, нагреваемых в области ниже полутени и теряющих избыток тепла на поверхности. Поскольку исследуемая активная область была чрезвычайно мощной, условия выхода магнитного поля и динамика всплывающих магнитных петель проявлялись наиболее сильно, следовательно, полученные результаты можно распространить на все активные области средних и больших размеров.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Динамика лучевых скоростей в фотосфере при возникновении активных областей. // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88, N2, С. 184 – 195.

Григорьев В.М., Ермакова Л.В., Хлыстова А.И. Фотосферное магнитное поле и движения в активной области от момента её возникновения до развития пор. // *Известия Крымской Астрофизической Обсерватории.* Т. 107, № 1, С.226, 2011.

1.22. Исследование условий формирования бесстолкновительного ударного фронта перед корональным выбросом массы (ИСЗФ СО РАН)

Исследована поршневая ударная волна, возбуждаемая корональным выбросом массы. Показано, что на расстояниях $R < 6R_0$ от центра Солнца (R_0 - радиус Солнца) измеренная ширина ударного фронта δF порядка длины свободного пробега протонов λ_p , а значит механизм диссипации энергии во фронте, по- видимому, столкновительный. На расстояниях $R \geq 10-15R_0$ в передней части столкновительного ударного фронта наблюдается формирование нового разрыва с шириной $\delta F^* \ll \lambda_p$. В пределах погрешности величина $\delta F^* \approx 0.1-0.2 R_0$ не зависит от расстояния R и определяется пространственным разрешением инструмента LASCO C3. Соответственно, по измерениям на инструменте COR2, у которого разрешение $\approx 0.03 R_0$, величина $\delta F^* \approx 0.03-0.04R_0$. Сравнение экспериментальной зависимости альвеновского числа Маха MA от относительного скачка плотности ρ_2/ρ_1 на ударном разрыве шириной $\delta F^* \ll \lambda_p$ с расчетами в МГД приближении позволили отождествить его с бесстолкновительной ударной волной (Еселевич В.Г.).

Алтынцев А.Т., Богод, В.М. и Еселевич В.Г. “Эруптивные процессы в короне” // В монографии: “Экстремальные природные явления и катастрофы”, т. I: “Оценки и пути снижения негативных последствий природных явлений”. Ответственный составитель Собисевич А.Л. Издательство “ПРОБЕЛ 2000”, г. Москва, стр. 397-407, 2011.

Еселевич М. В., Еселевич В. Г. Оценка соотношений на ударном разрыве, возбуждаемом корональным выбросом массы // *Астрон. Журнал.* Т. 88, N4, С. 393 - 408, 2011.

Еселевич М. В., Еселевич В. Г. Некоторые особенности в развитии возмущеннойзоны и ударной волны впереди коронального выброса массы // *Астрон. Журнал.* Т. 88, N11, С. 1 - 13, 2011

1.23. Исследование начальной стадии движения лимбовых корональных выбросов массы (ИСЗФ СО РАН).

По данным GOES/SXI исследована начальная стадия движения шести быстрых (скорость больше 1500 км/с) корональных выбросов массы типа гало (ГКВМ), связанных с вспышками рентгеновского класса «X» и «M», и прослежено движение этих ГКВМ в поле зрения SOHO/LASCO C2 и C3. Показано, что основное ускорение рассмотренных ГКВМ

начинается до начала связанной с ГКВМ вспышки. Пять из шести изученных ГКВМ в течение начальной стадии их движения представляют собой петлеобразные структуры. В то же время движение ГКВМ от 29.10.03 начинается по данным разных инструментов в виде поступательного движения аркады петель или трех примыкающих друг к другу петлеобразных структур. Затем эта аркада преобразуется в одну петлеобразную структуру с широким фронтом. Установлено, что характер изменения скорости $V(t)$ и ускорения $a(t)$ для ГКВМ, возникающих в одной АО, оказывается подобным. Показано, что время основного ускорения ГКВМ близко ко времени нарастания интенсивности мягкого рентгеновского излучения из связанной с ГКВМ вспышки. Подтвержден вывод работы [Zhang and Dere, (2006)] о существовании обратной корреляции между амплитудой ускорения ГКВМ и длительностью основного ускорения выброса. Показано, что угловой размер всех рассмотренных ГКВМ увеличивается со временем до выхода ГКВМ в поле зрения LASCO C2 в несколько раз. Показано, что в 4 из 6 рассмотренных событий в первые минуты движения ГКВМ расширяются быстрее в поперечном направлении по сравнению с продольным, а затем, отношение продольного размера к поперечному изменяется слабо. Это указывает на установление автотельного режима расширения.

2. Физические процессы в гелиосфере

2.1. Режимы истечения и турбулентности солнечного ветра по данным экспериментов радиозондирования когерентными сигналами космических аппаратов (ИРЭ)

2.1.1. Анализ частотных флуктуаций когерентных сигналов при двукратном радиозондировании околосолнечной плазмы

В экспериментах радиозондирования солнечного ветра используются две схемы. В первом случае радиоволны излучаются с борта заходящего за Солнце космического аппарата (КА), проходят через околосолнечную плазму. Частота радиоволны, подвергшейся воздействию движущейся неоднородной плазмы, регистрируется наземными станциями слежения. В этом случае реализуется схема однократного радиозондирования околосолнечной плазмы. Во втором случае радиоволны излучаются с наземного пункта в сторону движущегося за Солнцем КА, принимаются бортовыми системами и после преобразования частоты переизлучаются в сторону наземных пунктов, где происходит регистрация частоты сигналов, которые проходят через околосолнечную плазму дважды. Двукратное и двухчастотное радиозондирование околосолнечной плазмы реализовано в экспериментах с КА ULYSSES, MARS EXPRESS, VENUS EXPRESS, ROSETTA в двух конфигурациях. В случае космического зонда ULYSSES с наземного пункта в сторону КА излучаются сигналы дециметрового S-диапазона ($f_0=2.1$ ГГц), которые трансформируются на борту КА в сигналы дециметрового диапазона ($f_s=2.3$ ГГц = $f_0 \cdot \gamma_s$, $\gamma_s=240/221$) и сантиметрового X-диапазона ($f_x=8.4$ ГГц = $f_0 \cdot \gamma_x$, $\gamma_x=880/221$). В экспериментах радиозондирования с использованием КА MARS EXPRESS, VENUS EXPRESS, ROSETTA используется другая комбинация частот [1]. Запросный сигнал сантиметрового диапазона ($f_0=7.1$ ГГц) имеют высокую стабильность по частоте и амплитуде. Бортовые преобразователи обеспечивают умножение запросной частоты на коэффициенты $\gamma_x=880/749$ и $\gamma_s=240/749$, так что излучаемые в сторону наземных пунктов сигналы имеют частоты $f_x=8.4$ ГГц и $f_s=2.3$ ГГц с тем же соотношением частот 11/3.

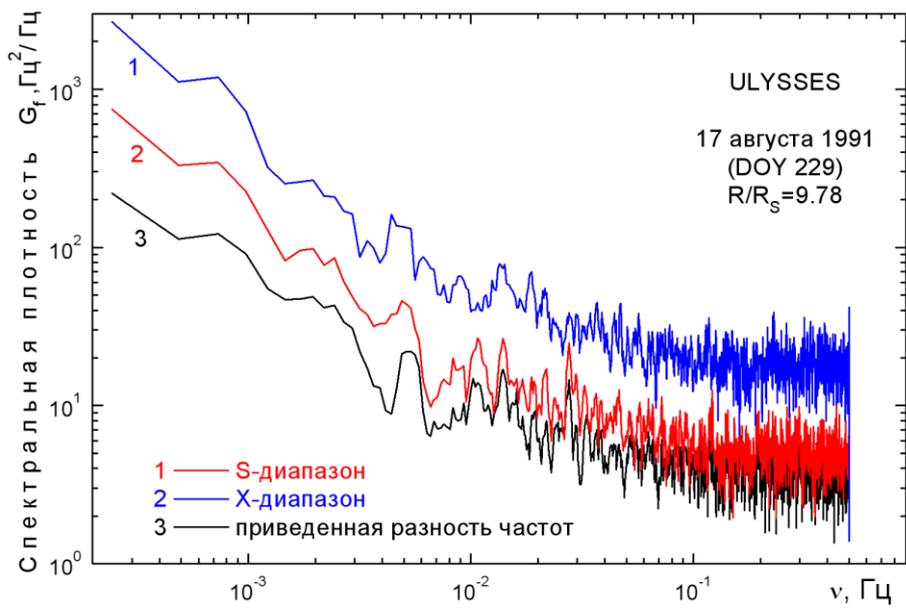


Рис. 1. Временные спектры флуктуаций частоты по данным эксперимента 17 августа 1991 г. КА ULYSSES, $R/R_S=9.8R_S$

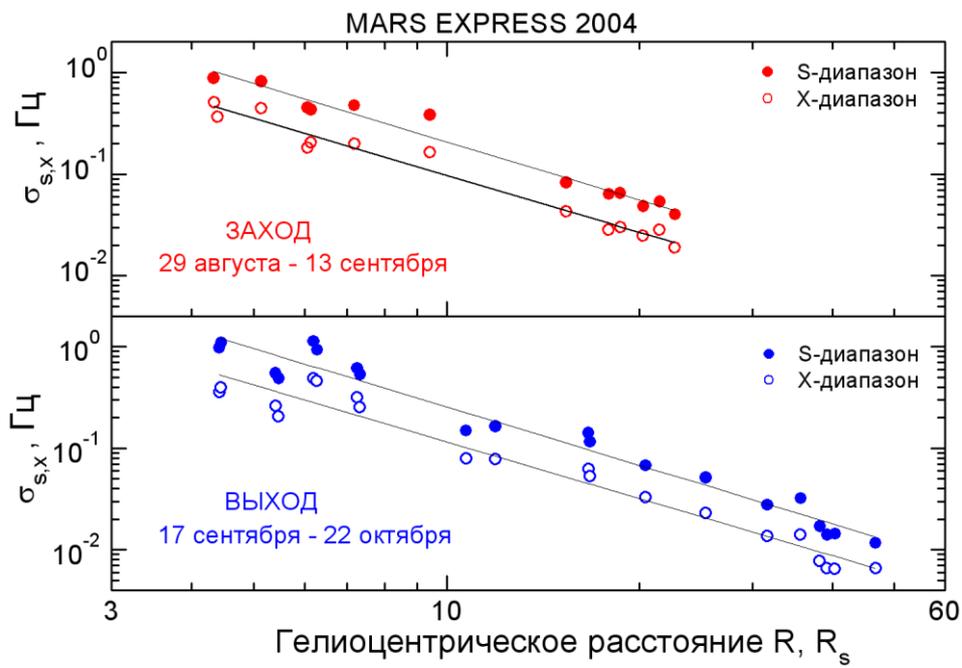


Рис. 2. Радиальные зависимости среднеквадратичных значений флуктуаций частоты сигналов S- и X-диапазонов

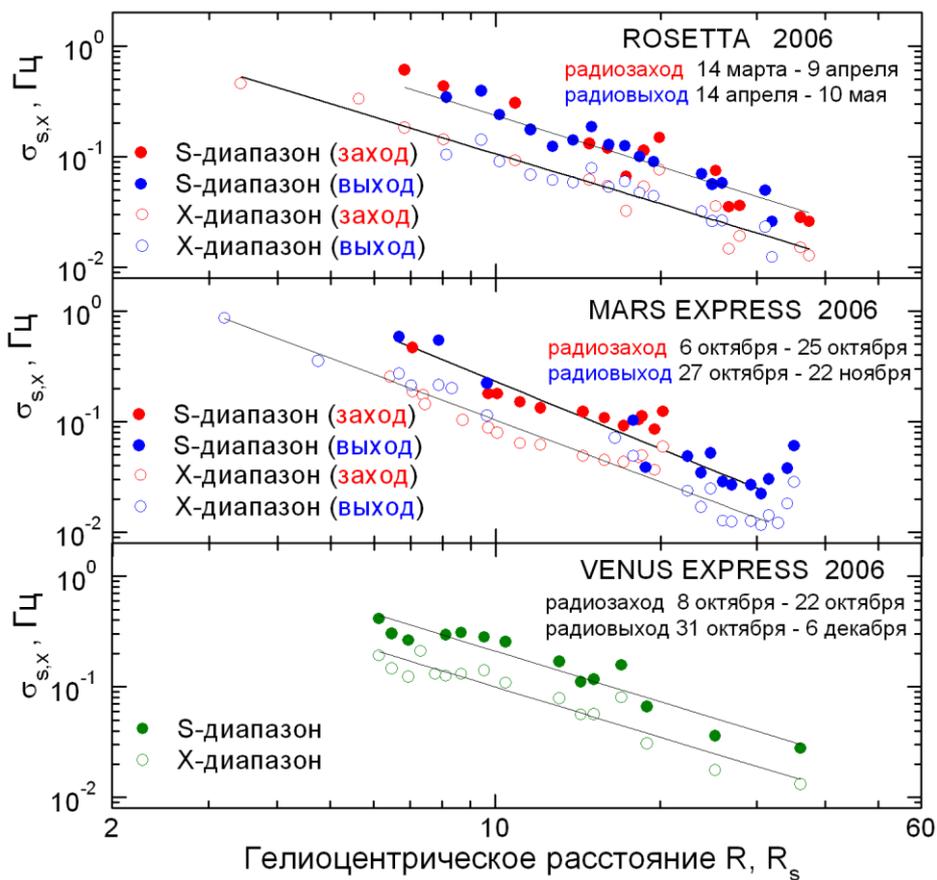


Рис. 3. Радиальные зависимости среднеквадратичных значений флуктуаций частоты сигналов S- и X-диапазонов.

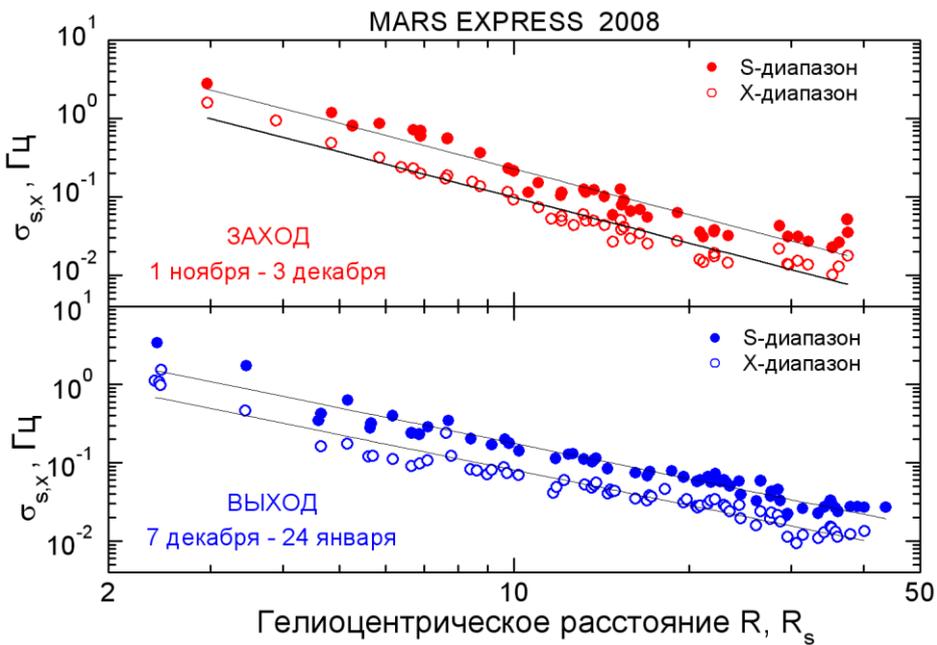


Рис. 4. Радиальные зависимости среднеквадратичных значений флуктуаций частоты сигналов S- и X-диапазонов.

2.1.2. Статистика квазипериодических флуктуаций электронной плотности плазмы, наблюдаемых при радиозондировании сверхкороны Солнца в экспериментах 1991-2009 гг.

Помимо исследования турбулентности плазмы, накопленные в результате проведения многочисленных экспериментов по радиозондированию данные предоставляют возможность провести поиск и получить информацию о волновых возмущениях в солнечном ветре с выделенным периодом. Интерес к этой задаче связан с тем, что в течение многих лет в нижней атмосфере Солнца наблюдались осцилляции с периодом около 5 минут [5]. Кроме того, квазипериодические возмущения этого же диапазона на гелиоцентрических расстояниях 4...8RS были обнаружены при анализе результатов обработки материалов, полученных в экспериментах радио-просвечивания околосолнечной плазмы линейно-поляризованными сигналами КА HELIOS-1,-2 [6]. Было установлено, что квазипериодические осцилляции угла поворота плоскости поляризации радиоволн обусловлена изолированными цугами альвеновских волн, которые могут занимать достаточно большой сегмент лучевой траектории в околосолнечной плазме. Спектральная обработка флуктуаций частоты, зарегистрированных в 2004 г. при радиозондировании внешней короны Солнца когерентными сигналами S- и X-диапазонов КА MARS EXPRESS, позволила детектировать квазипериодические осцилляции электронной плотности с тем же периодом ~5 минут [7]. Обнаруженные спектральные детали во флуктуациях частоты зондирующих сигналов обусловлены квазипериодическими возмущениями плотности, создаваемыми волнами магнитозвукового типа, генерируемыми локально при нелинейных взаимодействиях распространяющихся из основания короны альвеновских волн. В настоящем отчете представлены результаты исследований квазипериодической компоненты (QPC – quasi-periodic component) с использованием всего объема данных, полученных в крупномасштабных циклах радиозондирования внутреннего солнечного ветра, выполненных с использованием КА ULYSSES, GALILEO, MARS EXPRESS, VENUS EXPRESS, ROSETTA. Анализ этих данных обеспечил доказательство существования QPC электронной плотности на гелиоцентрических расстояниях 3...40RS и позволил найти их среднестатистические характеристики.

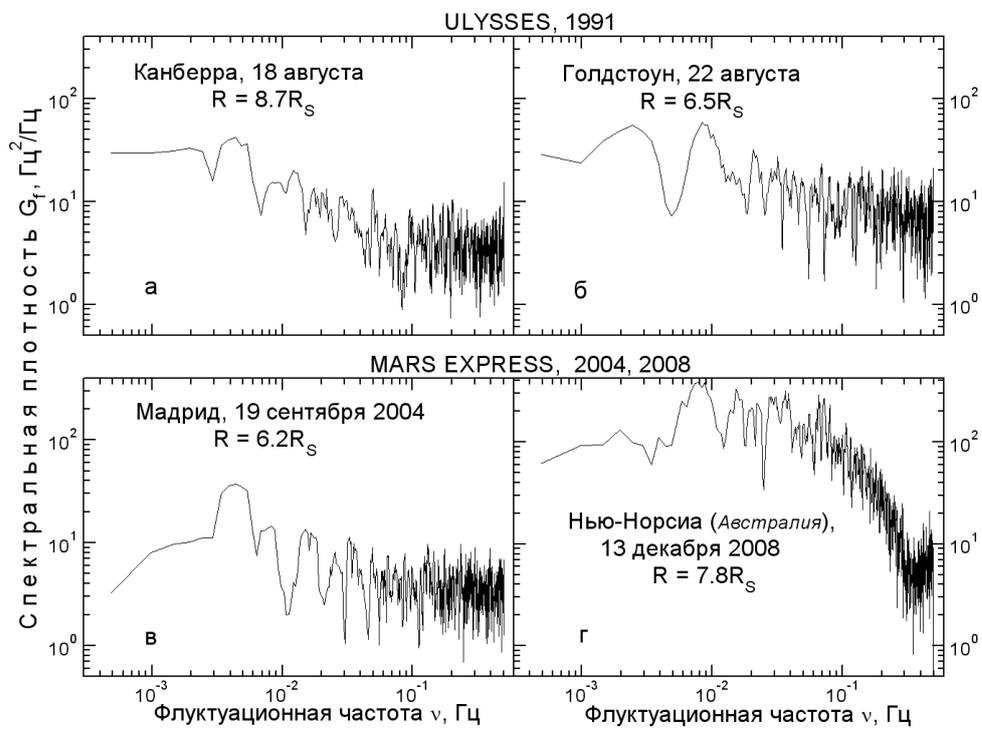


Рис. 5. Спектры флуктуаций приведенной разности частот для малых прицельных расстояний радиолуча

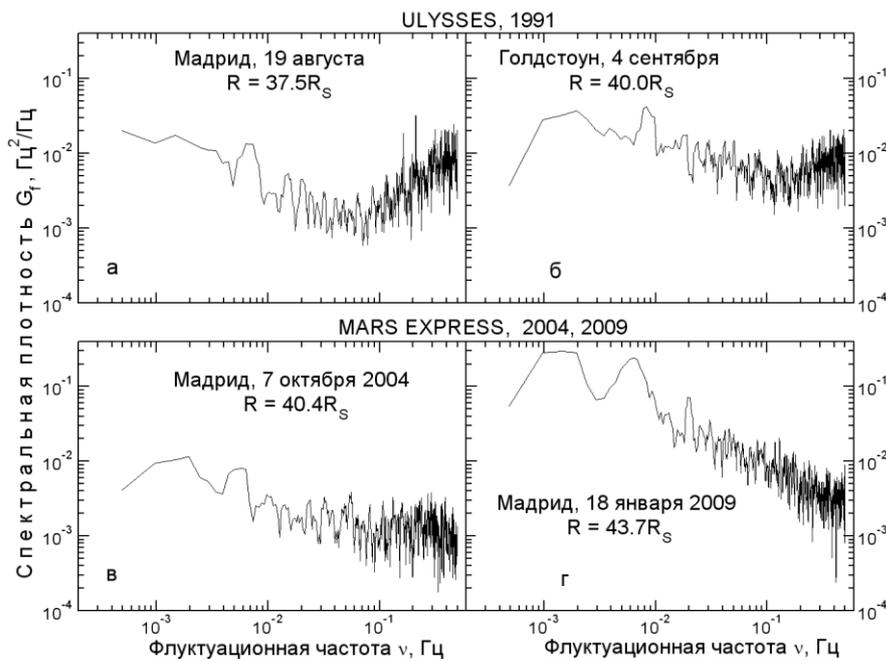


Рис. 6. Спектры флуктуаций приведенной разности частот для больших прицельных расстояний радиолуча

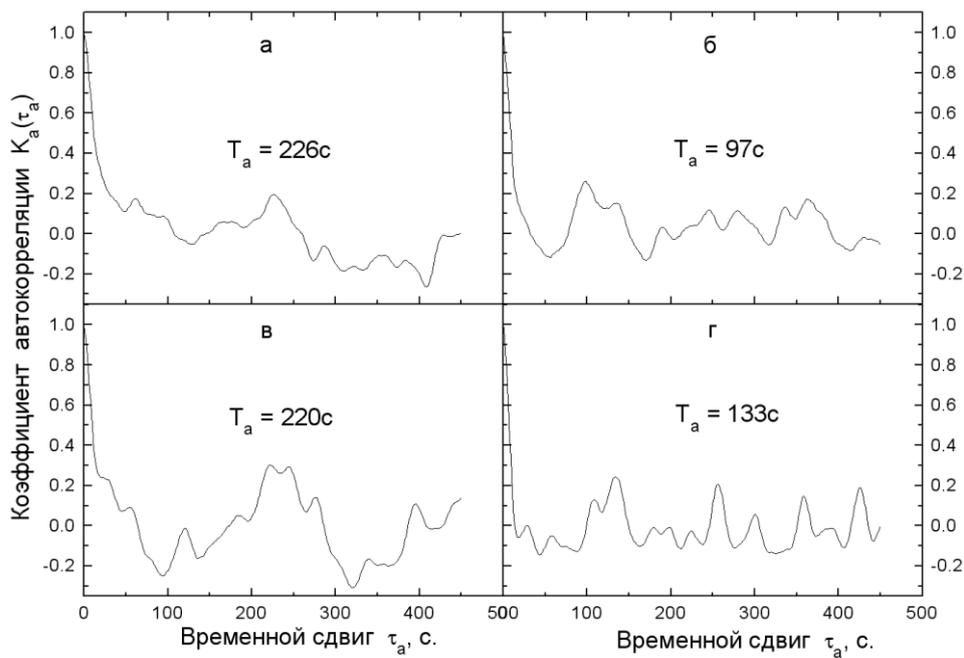


Рис. 7. Автокорреляционные функции приведенной разности частот зондирующих сигналов для малых прицельных расстояний радиолуча.

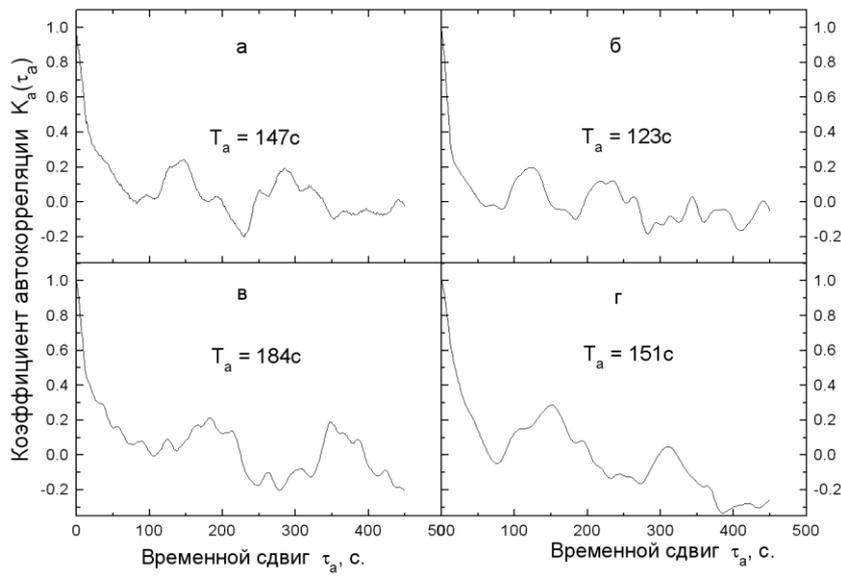


Рис. 8. Автокорреляционные функции приведенной разности частот зондирующих сигналов для больших прицельных расстояний радиолуча.

2.1.3. О возможности определения интегральной электронной концентрации межпланетной трассы по искажениям сверхкороткого радиоимпульса

Основные сведения о солнечном ветре в областях его формирования и ускорения, недоступных для прямых измерений, получены методом радиопросвечивания околосолнечного пространства монохроматическими сигналами космических аппаратов (КА). Анализ большого объема экспериментальных данных позволил исследовать глобальную структуру турбулентности и найти радиальные зависимости основных характеристик солнечного ветра. Такая информация необходима для решения основной проблемы солнечного ветра: какой физический механизм является ответственным за его ускорение до сверхзвуковых скоростей. Для получения характеристик просвечиваемой среды по радиоданным разработан ряд методик, основанных на анализе вариаций частоты, фазы, амплитуды, угла поворота плоскости поляризации и группового запаздывания радиоволн. Они позволили исследовать режимы турбулентности и истечения солнечного ветра, обнаруживать и изучать крупномасштабные плазменные структуры, а также установить закономерности распространения радиоволн в солнечной короне. Интегральную электронную концентрацию (Total Electron Content - *TEC*) на трассе *КА-Земля* определяют по результатам двухчастотного когерентного радиозондирования околосолнечной плазмы на основе методики, использующей зависимость группового запаздывания радиоволн от частоты [8,9]. Анализ экспериментальных данных позволил найти зависимость *TEC* от гелиоцентрического расстояния и фазы цикла солнечной активности, получить сведения о пространственном распределении концентрации плазмы в сверхкороне Солнца. Дальнейшее расширение объема информации о *TEC* может быть, по-видимому, достигнуто путем перехода к измерениям, в рамках которых анализируется частота принимаемого сигнала, точнее, вариации его частоты, привнесенные влиянием среды распространения. Точность такого рода методик на порядки величины выше точности методик, основанных на измерениях групповой задержки сигнала [10]. Поэтому их содержание и обоснование представляют значительный научный интерес.

Цель работы состоит в теоретическом обосновании возможности определения *TEC* околосолнечной (межпланетной) трассы по измерениям мгновенной частоты колебаний напряженности электрического поля в прошедшем по ней сверхкоротком радиоимпульсе.

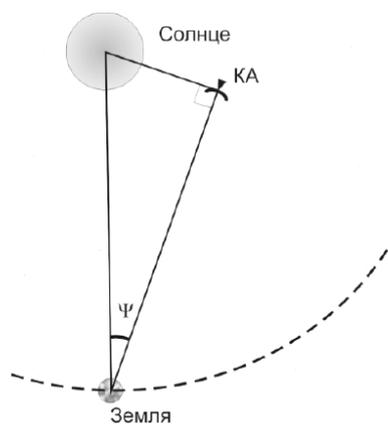


Рис. 9. Геометрия трассы радиоимпульсного зондирования солнечного ветра на трассе КА-Земля.

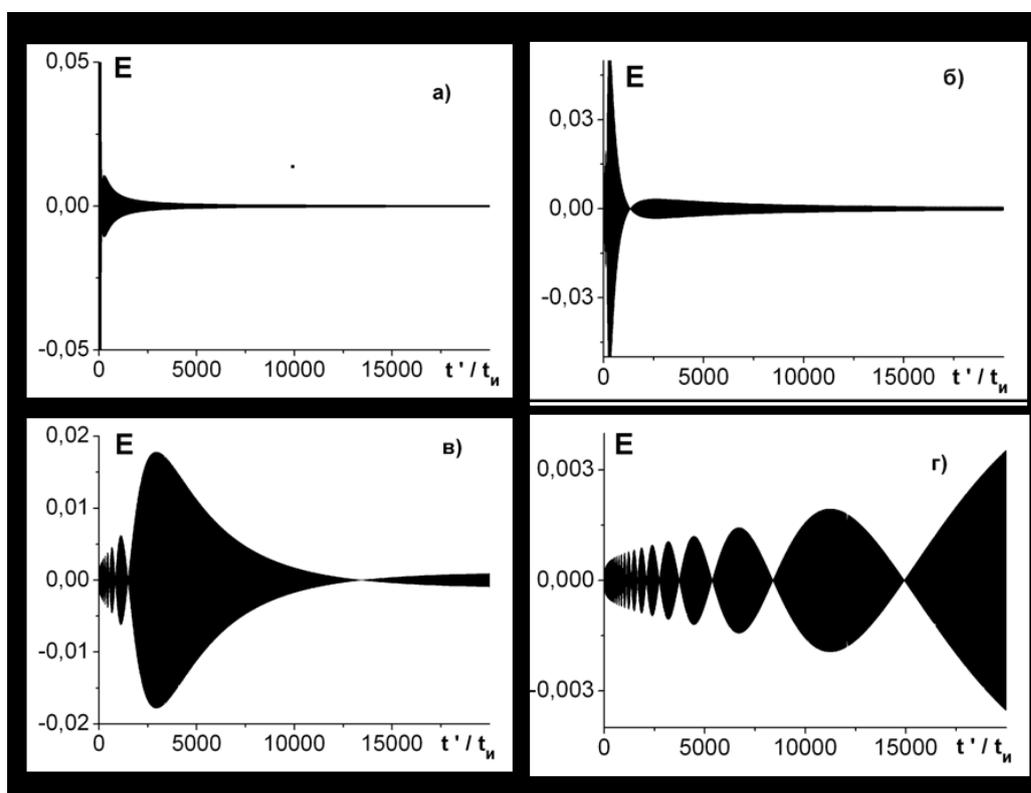


Рис. 10. Влияние ТЕС межпланетной трассы на дисперсионные искажения сверхкороткого радиоимпульса (10) при разных параметрах.

Цитируемая литература:

1. Pätzold M., Neubauer F.M., Carone L. et al. // In: Mars Ex-press: the scientific payload. Ed. by Andrew Wilson, scientific coordination: Agustín Chicarro. ESA SP-1240, Noordwijk, Netherlands: ESA Publications Division. P. 141-163. 2004.
2. Кравцов Ю.А., Саичев А.И. // УФН. 1982. Т. 137. № 3. С. 501-527.
3. Efimov A.I., Bird M.K., Chashei I.V., Samoznaev L.N. // Advances in Space Research. 2004. V. 33. № 5. P. 701-706.
4. Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Chashei I.V., Bird M.K., Plettemeier D // Radiotekhnika I Elektronika. 2009. V. 54. № 7. P. 773-784.
5. Каплан С.А., Пикельнер С.Б., Цытович В.Н. М.: НАУКА. 1977. 255 с.
6. Ефимов А.И., Самознаев Л.Н., Андреев В.Е., Чашей И.В., Бёрд М.К. // Письма в АЖ. 2000. Т. 26. № 8. С. 630-640.
7. Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Rudash V.K., Chashei I.V., Bird M.K., Pätzold M., Tellmann S. // in: Solar-Wind-12. International Conference. AIP Conf. Proc. ed. by M. Maksimovic et al. 2010. V. 1216. P. 90-93.

8. Bird M.K., Volland H., Pätzold M., Edenhofer P., Asmar S.W., Brenke J.P. // The Astrophysical Journal. 1994. V. 373. № 5. P. 373-381.
9. Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Rudash V.K., Chashei I.V., Bird M.K., Pätzold M., Tellmann S. // Twelfth International Solar Wind Conference, edited by M. Maksimovic, K. Is-sautier, N. Meyer-Vernet et al. American Institute of Physics. 2010. P. 94-97.
10. Bird M.K. // Space Science Reviews. 1982. V. 33. № 2. P. 99-126.
11. Гуляев Ю.В., Кравченко В.Ф., Лазоренко О.В. и др. // 1-ая Межд. конф. "Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике": Суздаль, 2005. Доклады: М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова. 2005. С. 2-6.
12. Гуляев Ю.В., Стрелков Г.М. // Докл. РАН. 2006. 408. № 6. С. 754-757.

Отв.: к.т.н. Ефимов А.И.

2.2. Связь параметров солнечного ветра с ультрафиолетовым и радиоизлучением корональных дыр (ИСЗФ СО РАН)

Выполнен сравнительный анализ пространственных и яркостных характеристик КД в различных диапазонах электромагнитного излучения (ультрафиолетового на EIT КА SOHO, радиоизлучения на частотах 17, 5.7 ГГц, 327 и 150.9 МГц на гелиографах NoRH (Япония), ССРТ (Иркутск) и Nançay (Франция)) и параметров солнечного ветра с КА ACE. Обнаружено, что радиояркости структур в КД в широком диапазоне частот связаны линейной зависимостью с яркостью ультрафиолетового излучения.

Линейные зависимости между радиояркостями на разных частотах, излучаемых источниками в диапазоне высот от хромосферы до верхней короны, и величиной скорости СВ около Земли указывает на существование единого механизма ускорения СВ. Полученные закономерности ограничивают выбор моделей ускорения СВ и могут стать основой для алгоритмов прогноза высокоскоростных потоков СВ.

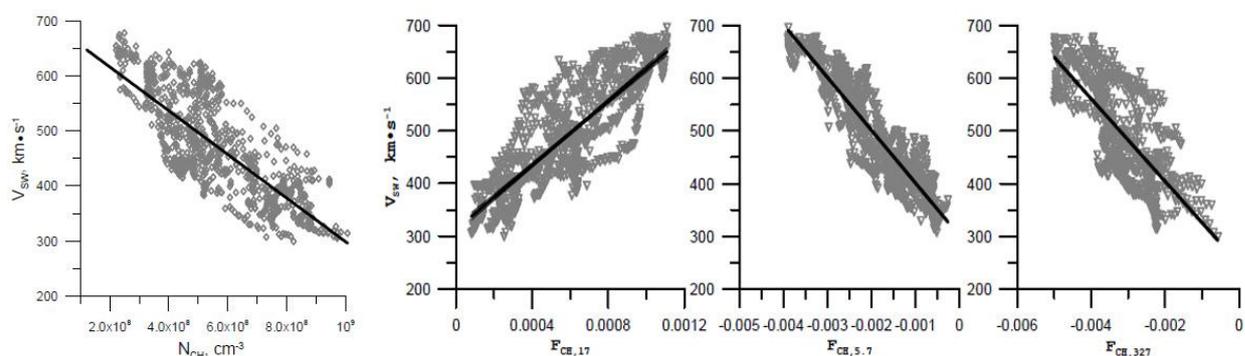


Рис. 1. Корреляционная зависимость между электронной концентрацией (слева), потоком радиоизлучения в единицах спокойного Солнца на 17, 5.7 ГГц и 237 МГц в корональных дырах и скоростью солнечного ветра в точке L1.

Prosovetsky D., Myagkova I. The connection of solar wind parameters with radio and UV emission from coronal holes // Solar Physics, 2011, Online First, DOI: 10.1007/s11207-011-9870-y

2.2. Эксперимент «Плазма-Ф» работает на орбите (ИКИ)

18 июля 2011 г. был запущен высокоапогейный спутник Земли «Спектр-Р», на котором установлен комплекс научного эксперимента «Плазма-Ф»

Этот комплекс включает в себя:

- монитор энергичных частиц МЭП (руководитель работ от ИКИ А.А. Петрукович);
- энергоспектрометр плазмы БМСВ (руководитель работ от ИКИ Г.Н. Застенкер);
- магнитометр ММФФ (руководитель работ от ИКИ А.А. Скальский);
- систему сбора научной информации ССНИ-2 (руководитель работ Л.С. Чесалин).

Приборы были включены после 05.07.2011 г. и с тех пор (за исключением прибора ММФФ) непрерывно работают на орбите выдавая качественно новую научную информацию. ССНИ-2 обеспечивает гибкое управление потоками информации от приборов в условиях жесткого ограничения длительности сеансов связи с КА.

Ключевой особенностью приборов МЭП и БМСВ является их чрезвычайно высокое (рекордное) временное разрешение, что позволяет исследовать тонкие структуры и быстрые процессы в солнечном ветре и во внешней магнитосфере Земли. Так, например, с помощью прибора БМСВ были обнаружены быстрые (за доли секунды) и большие (на несколько градусов) вариации углов прихода потока солнечного ветра, что до сих пор еще никем не наблюдалось. Прибор МЭП позволил наблюдать квази-периодическую структуру возрастания потока ионов с энергией около 200 кэВ с периодом, близким к периоду циклотронного вращения протонов в магнитном поле солнечного ветра.

Первые результаты работы комплекса «Плазма-Ф» уже опубликованы.

Застенкер Г.Н., Зеленый Л.М., Петрукович А.А., Назаров В.Н., Чесалин Л.С. и др., «Загадки солнечного ветра», «Российский космос», №10, 2011 г. стр. 26-31.

Отв.: Г.Н. Застенкер, проф., д.ф.-м.н., т.: 333-13-88, gzastenk@iki.rssi.ru

А.А. Петрукович, д.ф.-м.н., т. 333-32-67, apetruko@iki.rssi.ru

Л.С. Чесалин, к.ф.-м.н., т. 333-30-67, lchesali@iki.rssi.ru

В.Н. Назаров, т.333040-45

2.4. Исследование структуры аномалии горячего потока (АГП) плазмы у фронта околоземной ударной волны (ИКИ)

Целью исследования является изучение структуры аномалии горячего потока (АГП), обнаруженной хвостовым зондом проекта Интербол, 14 марта 1996г. Работа основана на данных, полученных ионным спектрометром СКА-1, электронным спектрометром Электрон, а так же магнитометром МИФ-3. Вычислена ориентация межпланетного токового слоя, предположительно сформировавшего эту аномалию. По динамическим спектрам ионов и электронов выделено несколько характерных областей в самой аномалии. С помощью информации о локальной геометрии ударной волны выяснено, что электрическое поле, возникшее из-за движения заряженных частиц, было направлено к токовому слою по обе стороны от него, что согласуется с более ранними предположениями о причинах возникновения АГП.

Была произведена оценка скорости смещения аномалии вдоль ударной волны и оценка размера АГП. Анализ скоростей плазмы в аномалии показал, что образование является расширяющимся в стороны от токового слоя. Вероятной причиной этого расширения является соотношение внутреннего и внешнего давлений в области аномалии. Подробное изучение функций распределения ионов по скоростям показало, что аномалия состоит из двух частей, при этом в одной части образования скорости плазмы имеют солнечное направление, что может свидетельствовать о конвективных процессах в АГП. Анализ магнитных полей и функций распределения ионов по скоростям позволил определить область энерговыведения.

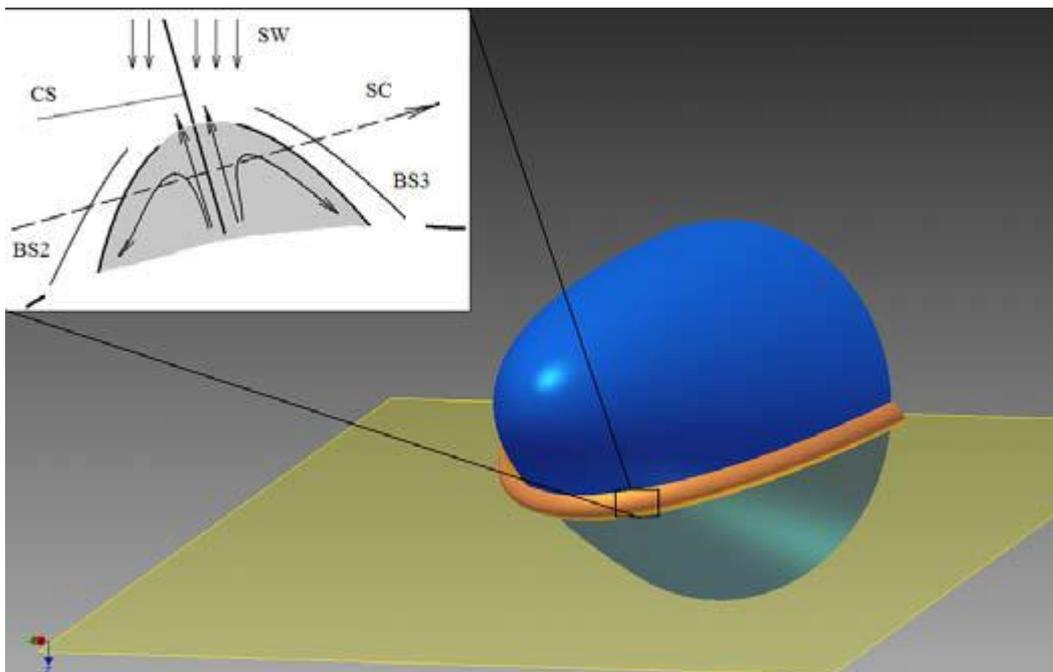


Рис.1. Схема образования и устройства АГП. Синим цветом – отошедшая ударная волна, жёлтым – межпланетный токовый слой, оранжевый – разогретая плазма. На схеме: BS2, BS3 – вторичные ударные волны, как на препятствии, SW – поток солнечного ветра, CS – линия токового слоя, секущего ударную волну, штриховой линией отмечено возможное направление сечения области космическим аппаратом (SC), серым цветом закрашена область термализованной плазмы, стрелками в этой области отмечено одна из возможных схем конвективных течений плазмы внутри.

А. Ю. Шестаков, О.Л. Вайсберг, Исследование структуры аномалии горячего потока (АГП) плазмы у фронта околоземной ударной волны, Геомагнетизм и Аэрономия, 2011, принято в печать.

Отв.: А. Ю. Шестаков, sartiom1@yandex.ru
 О.Л. Вайсберг, д.ф.-м.н., olegv@iki.rssi.ru

2.5. Аналитическая модель электрических токов в переходной области магнитосферы (ИКИ, НИИЯФ МГУ)

Построена аналитическая модель объемных электрических токов в области между головной ударной волной Земли и магнитопаузой. Найдены поверхностные токи на головной ударной волне и на магнитопаузе при их параболической форме. Свободными параметрами модели являются: 1) вектор межпланетного магнитного поля, 2) число Маха в солнечном ветре, 3) расстояния от Земли до лобовой точки головной ударной волны и магнитопаузы; 4) фактор сжатия магнитного поля на магнитопаузе. Выполнены численные расчеты электрических токов в рамках модели при различных параметрах. Электрические токи могут по-разному соединять магнитосферу с гелиосферой.

E. Romashets, M.Vandas, I.S. Veselovsky. Analytical description of electric currents in the magnetosheath region, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2010, Volume 72, Issue 18, 1401-1407.

Отв.: Веселовский И. С., д.ф.-м.н., проф., т. 939-1298, veselov@dec1.sinp.msu.ru

2.6. Исследование турбулентных флуктуаций в магнитослое (ИКИ, НИИЯФ МГУ)

Результаты наблюдений в магнитослое неоднократно демонстрировали существование высокого уровня флуктуаций магнитного поля намного превышающего уровень флуктуаций в солнечном ветре. Существование таких флуктуаций требует определения зависимости величины и ориентации магнитного поля у магнитопаузы от величины и ориентации магнитного поля в солнечном ветре. Обычно при анализе процессов внутри магнитосферы используются данные, полученные на значительном удалении от магнитосферы (ACE, Wind и др.). При этом направление магнитного поля в солнечном ветре может измениться и не совпадать с полем, действующим на магнитосферу. Проект THEMIS давал возможность сравнивать поле непосредственно перед ударной волной и у магнитопаузы. Полученные предварительные результаты показывают (см. рис.), что вследствие развития турбулентных процессов в магнитослое, магнитное поле у магнитопаузы сильно отличается от предсказаний теории ламинарного течения плазмы с замороженным магнитным полем, вплоть до изменения знака. Остается нерешенным вопрос об условиях баланса давлений на магнитопаузе при турбулентных флуктуациях магнитного поля в магнитослое. Работы в данном направлении продолжались с использованием методики, описанной в работе [Знаткова и др., 2011]. Был проведен отбор событий, позволяющих одновременно сравнивать параметры плазмы и магнитного поля вне и внутри магнитопаузы на близких расстояниях.

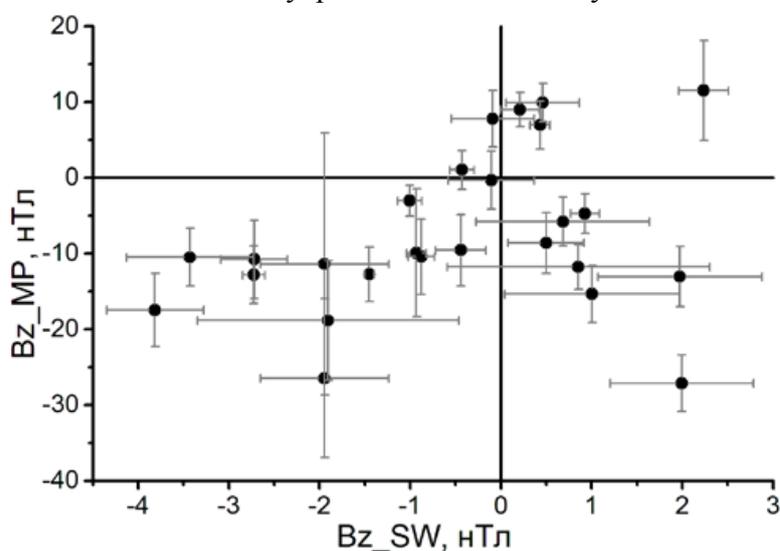


Рис. Зависимость z -компоненты магнитного поля у магнитопаузы от магнитного поля солнечного ветра непосредственно перед ударной волной для рассмотренного набора из 26 событий при усреднении за период 30 секунд с момента пересечения магнитопаузы [Pulinets et al., 2011]

Знаткова С. С., Е. Е. Антонова, Г.Н. Застенкер, И. П. Кирпичев, Баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS, Космические исследования, т. 49, №1, с. 5-23, 2011.

Pulinets M. S., M. O. Riazantseva, E. E. Antonova, I. P. Kirpichev, The Dependence of the Magnetic Field Near the Subsolar Magnetopause on IMF in Accordance with THEMIS Data, 20th Annual Conference of Doctoral Students WDS'11 "Week of doctoral students 2011" Charles university faculty of mathematics and physics Prague, Czechia, May 31, 2011 to June 3, 2011, Part II Physics of Plasmas and Ionized Media, editors J. Šafránková and J. Pavlů, pp. 45-51, 2011. ISBN 978-80-7378-185-9.

Отв. Антонова Е. Е., проф., д.ф.-м.н., т. 333-13-88, antonova@orearm.msk.ru

Застенкер Г.Н., проф., д.ф.-м.н., т.: 333-13-88, gzastenk@iki.rssi.ru

Кирпичев И. П., к.ф.-м.н., т. 333-1467, ikir@iki.rssi.ru

2.7. Аномальное взаимодействие потока плазмы с погранслоем геомагнитной ловушки (ИКИ, НИЦ «Курчатовский институт»)

На основе данных спутников ИНТЕРБОЛ-1, GEOTAIL, THEMIS и CLUSTER объяснен механизм аномальной динамики магнитослоя, границы которого могут локально деформироваться на расстояния, сравнимые с его толщиной. Так, граница магнитосферы – магнитопауза – прогибается на несколько радиусов Земли RE под действием сверхмагнитозвуковых плазменных струй (СПС), а не минимумов давления плазмы, как предполагалось ранее. СПС с кинетическим давлением в несколько раз большим давления солнечного ветра и магнитного давления под магнитопаузой способны смять ее и даже вытолкнуть ее край из области магнитослоя, определяемой средним балансом давлений. Аномальная динамика магнитослоя инициируется аномалиями потока плазмы (АП), вызываемыми вращательными разрывами, скачками давления в солнечном ветре и межпланетными ударными волнами, взаимодействующими с головной ударной волной. Нами показано, что механизм образования СПС, прилегающих к АП, связан с компенсацией уменьшения потока в АП за счет ускорения потока в СПС, обусловленного полем поляризации на внешней границе АП. Статистически СПС являются экстремальными событиями со свойствами перемежаемости и мультифрактальности в погранслоях геомагнитной ловушки. Т.о. СПС обеспечивают «дальнедействующую» связь между глобальными и микро масштабами.

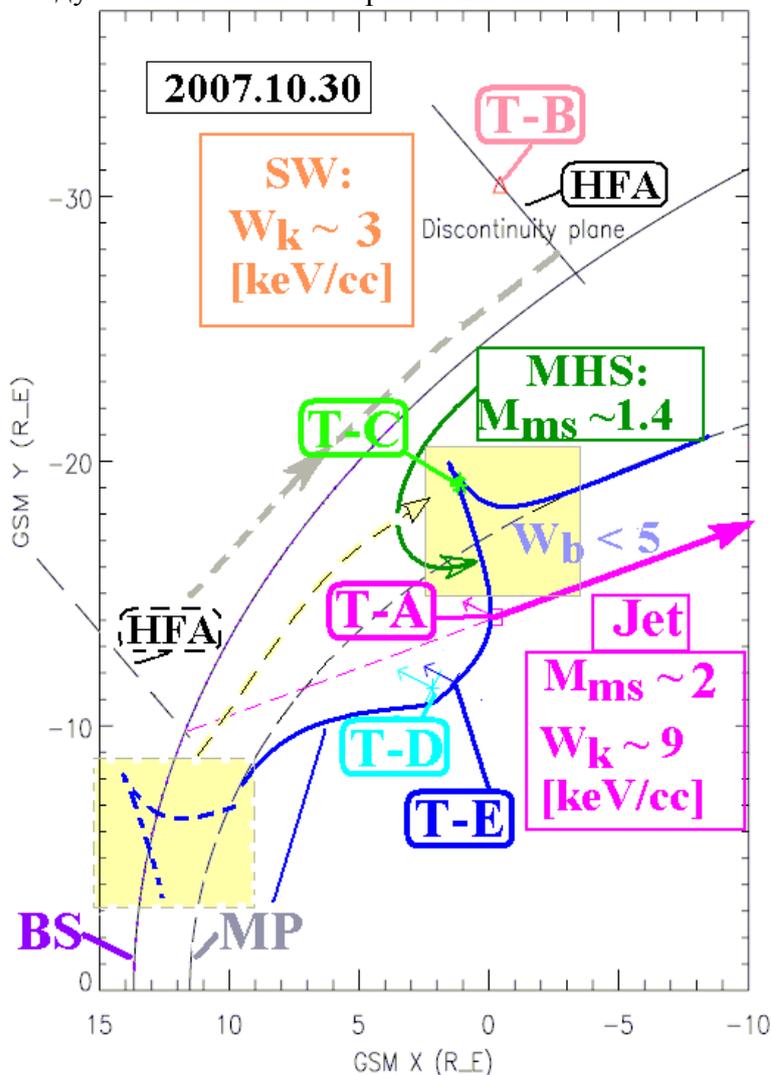


Рис. Деформация магнитопаузы (обозначено "MP", THEMIS, 30.10. 2007 г.) под действием СПС ("Jet", $M_{ms} \sim 2$), вызванным, по всей видимости, АП ("HFA"). Обозначено также: "SW"- солнечный ветер, "MSH"- магнитослой, магнитное давление - W_b в [кэВ/см³]. Приблизительная позиция АП ("HFA") в событии "B", в которой образовался СПС ("Jet"), показана пунктиром (см. "HFA" в пунктирной рамке в левой нижней части Рис.), тонким пунктиром на продолжении вектора "Jet" дана вероятная траектория СПС ("Jet") от ударной волны до магнитопаузы.

В дневном магнитослое выступ магнитопаузы (пунктир в залитом квадрате с пунктирной границей) может выходить за среднюю ударную волну (“BS”) [1].

С. П. Савин, В. П. Будаев, Л. М. Зеленый, Э. Амата, Д. Сайбек, В. Н. Луценко, Н. Л. Бородкова, Х. Занг, В. Ангелопулос, Я. Шафранкова, З. Немечек, Я. Бленцки, Й. Бюхнер, Л.В. Козак, С. А. Романов, А. А. Скальский, В. Красносельских, Аномальное взаимодействие потока плазмы с погранслоем геомагнитной ловушки, Письма в ЖЭТФ, т. 93, вып. 12, с. 837-846, 2011.

В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зеленый, Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса, УФН, т. 181, №9, с. 905-952, 2011.

Отв.: С. П. Савин, д.ф.-м.н., т. 333 11 00, E-mail: ssavin@iki.rssi.ru

2.8. Исследование границы гелиосферы с помощью анализа экспериментальных данных по рассеянному Лайман-альфа излучению (ИКИ)

В 2011 году были проанализированы данные по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению, полученные на космическом аппарате SOHO/SWAN. А именно, изучались карты интенсивности излучения и карты первого момента спектра или величины доплеровского сдвига относительно центра линии. Проводилось сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов, выполненных на основании разработанной нами кинетической модели распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. Задача нахождения функции распределения атомов по скоростям в гелиосфере решалась в наиболее реалистичной трехмерной и нестационарной постановке. При этом учитывалась гелиоширотная анизотропия параметров солнечного ветра, влияние 11-летнего цикла солнечной активности, а также влияние межзвездного магнитного поля. Сравнение карт интенсивности показало, что в период минимума солнечной активности наблюдается хорошее совпадение между теорией и экспериментом; в период максимума активности возникают различия в хвостовой части гелиосферы. Также исследовалось отклонение движения межзвездных атомов водорода по сравнению с атомами гелия. Этот эффект был зафиксирован экспериментально на КА SOHO/SWAN, и объясняется влиянием межзвездного магнитного поля. Нами были проведены расчеты величины отклонения для различных величин и направлений межзвездного магнитного поля. Было показано, что эта величина существенно зависит от напряженности межзвездного магнитного поля. Это означает, что такое исследование является способом удаленной диагностики параметров межзвездной среды (в частности, магнитного поля).

Katushkina O.A., Izmodenov V.V., Spectral properties of backscattered solar Ly-alpha radiation in the heliosphere: a theoretical search of the heliospheric boundaries effects, Advances in Space Research, Volume 48, pp. 1967-1979, 2011.

Отв.: Измоденов В.В., д.ф.-м.н., т. 333-41-88, izmod@iki.rssi.ru
Катушкина О.А., м.н.с., т. 333-41-88, okat@iki.rssi.ru

2.9. Первое измерение галактического излучения в линии лайман-альфа водорода и рассеянное лайман-альфа излучение в области гелиосферного ударного слоя: анализ данных КА Вояджер 1 (ИКИ)

До настоящего времени лайман-альфа излучение от нашей Галактики не могло быть измерено из-за того, что оно «замаскировано» другими более яркими источниками излучения. Вне экзосферы основным источником лайман-альфа излучения является рассеянное на межзвездных атомах водорода солнечное излучение. Измерения лайман-альфа излучения на КА Вояджер 1 и 2, которые в настоящее время пересекли

гелиосферную ударную волну и удаляются от Солнца со скоростью 3.5 а.е. в год, показывают, что с увеличением гелиоцентрического расстояния интенсивность лайман-альфа гелиосферного происхождения падает. На основе детального моделирования распределения межзвездных атомов во внешней гелиосфере, а также моделирования рассеянного солнечного лайман-альфа излучения с учетом многократного рассеяния, было показано, что начиная с 40 а.е. на КА Вояджер 2 было зарегистрировано лайман-альфа излучение, имеющее галактическое происхождение. В работе показано, что пространственное распределение галактического лайман-альфа излучения не согласуется с гелиосферными моделями, однако хорошо согласуется с распределением галактического излучения балмеровской серии (H-alpha).

Было проведено сканирование в направлениях пересекающих плоскость Галактики, соответствующих хорошо известным областям образования звезд. Интенсивность галактического излучения составляет порядка 3-4 рэлей в наиболее ярких областях. Показано, что эти области коорелируют, но не совпадают с областями максимума свечения H-alpha излучения, что хорошо согласуется с моделями переноса излучения в областях НII окруженных горячим газом. Также показано, что увеличение интенсивности свечения наблюдается в областях существенно выше плоскости галактики, там, где свечение в H-alpha не наблюдается. Теоретические оценки показывают, что наблюдаемое нами излучение в наиболее ярких областях составляет всего лишь ~3% свечения от областей НII и имеет сильные пространственные неоднородности. Остальные 97 % свечения поглощаются в окружающем области НII нейтральном газе.

Проведенные измерения галактического лайман-альфа на КА Вояджер-1 открывают путь будущим картографическим и спектральным экспериментам по изучению галактического лайман-альфа излучения, а также позволяют провести верификацию моделей переноса излучения, которые в настоящее время используются для далеких галактик.

Lallement R., Quemerais E., Bertaux J., Sandel B., Izmodenov V., Voyager makes the first measurements of Hydrogen Lyman- alpha diffuse emission from the Galaxy, Science, принята в печать, электронная версия опубликована 1 декабря 2011 на сайте журнала (<http://www.sciencemag.org/content/early/recent>).

Отв.: Измоденов В.В., д.ф.-м.н., т. 333-41-88, izmod@iki.rssi.ru

2.10. Моделирование нестационарного течения солнечного ветра на границе гелиосферы при прохождении межпланетных ударных волн (ИКИ)

Целью данного исследования являлось изучение прохождения пар ударных волн, формирующихся в солнечном ветре в период солнечного минимума, к границам гелиосферы, в область за гелиосферной ударной волной. Измерения плазмы солнечного ветра в этой области на космическом аппарате Вояджер 2 показывают сильные флуктуации параметров солнечного ветра. Причины такого сильно нестационарного течения солнечного ветра пока не объяснены. На основе трехмерной МГД модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой исследовано прохождение пары ударных волн из сверхзвукового солнечного ветра в область гелиосферного ударного слоя, где солнечный ветер дозвуковой. Модель учитывает влияние нейтральных атомов водорода, межпланетное и межзвездное магнитное поле. Исследовано изменение структуры пары ударных волн в сверхзвуковом солнечном ветре, прохождение через гелиосферную ударную волну, распространение в гелиосферном ударном слое и взаимодействие с гелиопаузой. Показано, что при распространении пары передней и обратной ударных волн в сверхзвуковом солнечном ветре ударные волны ослабевают. Взаимодействие с гелиосферной ударной волной приводит к возникновению нескольких сильных и слабых разрывов в области ударного слоя, обуславливающих сильные флуктуации в течении солнечного ветра. Результаты показали, что в гелиосферном ударном слое возникают ударные волны. Наблюдения Вояджера 2

показывают отсутствие ударных волн в гелиосферном ударном слое. Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных показывает необходимость учета в модели процессов, приводящих к диссипации ударных волн.

Provornikova E., Opher M., Izmodenov V., Toth G., 3D MHD modeling of the CMIR propagation in the heliosheath, Solar Heliospheric and Interplanetary Environment - 2011, 11-15 июля 2011, г.Сноумасс, Колорадо, США, 2011.

Provornikova E., Opher M., Izmodenov V., Toth G., Oran R., 3D MHD modeling of non-stationary flow in the heliosheath, AGU Fall - 2011, Abstract ID SH11A-1910.

Отв.: Измоденов В. В., д.ф.-м.н., т. 333-41-88, izmod@iki.rssi.ru

Проворникова Е. А., м.н.с., т. 333-41-88, provea@iki.rssi.ru

2.11. Сравнение результатов трехмерной кинетико-магнитогидродинамических и многожидкостных моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (ИКИ)

Было проведено сравнение результатов, полученных в рамках кинетико-магнитогидродинамической модели, разработанной в ИКИ РАН, с результатами упрощенных многожидкостных моделей, разрабатываемых американскими коллегами. Показано, что, несмотря на качественное совпадение многих результатов, результаты моделей существенно отличаются количественно. Следовательно, использование многожидкостного подхода неприемлемо при анализе экспериментальных данных.

Alouani-Bibi, F.; Opher, M.; Alexashov, D.; Izmodenov, V.; Toth, G., Kinetic vs. multi-fluid approach for interstellar neutrals in the heliosphere: exploration of the interstellar magnetic field effects, Astrophysical Journal, Volume 734, Issue 1, article id. 45, 2011.

Отв.: Измоденов В. В., д.ф.-м.н., т. 333-41-88, izmod@iki.rssi.ru

Алексашов Д. Б., с.н.с., т. 333-41-88

2.12. Взаимодействие межзвездного частично холодного облака с окружающей горячей плазмой (ИКИ)

Продолжено исследование взаимодействия холодного нейтрального межзвездного облака и горячей плазмы в рамках двухжидкостной модели. Проанализированы адиабатическое и изотермическое течения плазменной компоненты в области взаимодействия. Результаты адиабатической модели позволяют заключить, что процесс перезарядки может быть одним из важнейших механизмов, который обеспечивает существование холодных межзвездных облаков в горячей плазме Локального пузыря. Численное решение показывает, что существуют волны, периодически рождающиеся на границе облака. Эти возмущения распространяются внутрь облака и затем отражаются от его центра.

В рамках модели, учитывающей изотермическое течение окружающей плазмы, было получено, что радиус межзвездного облака меняется в течение времени взаимодействия, облако расширяется. Нейтральный газ в облаке нагревается, концентрация нейтральных атомов в облаке уменьшается, а концентрация заряженных частиц увеличивается. Решение для изотермического случая позволяет определить время жизни межзвездных облаков в горячей плазме. Расчеты были проведены для облаков различных радиусов и с различной концентрацией атомов водорода. Для Локального межзвездного облака, в котором движется Солнце, время жизни составляет 1,5 млн. лет.

Отв.: Измоденов В. В., д.ф.-м.н., т. 333-41-88, izmod@iki.rssi.ru
Проворникова Е.А., м.н.с., т. 333-41 88, provea@iki.rssi.ru

2.13. Влияние граничных условий на сжатие самогравитирующего газа (ИКИ)

Аналитически и численно исследовано сжатие ограниченных объемов совершенного газа с целью определить возможные режимы установления гравитационного равновесия. Рассматривались одномерные плоские и сферически симметричные движения. Граница слоя (сферы) в начальный момент времени считалась произвольным разрывом. Выявлено два характерных режима движения. Первый реализуется при не слишком больших (по сравнению с длиной Джинса λ_J) толщинах слоя h и сопровождается продолжающимися длительное время осцилляциями параметров газа, рис. а, б. При этом время установления гравитационного равновесия определяется диссипативными свойствами применяемых разностных схем и потерями кинетической энергии вследствие возникновения ударных волн. Режим второго типа, называемый режимом быстрого сжатия (рис. в, г), отвечает значениям $h \sim \lambda_J$ и характеризуется быстрым по сравнению со временем λ_J/c (c – изотермическая скорость звука) увеличением плотности среды в области с масштабом много меньшим h . Построена аналитическая модель сжатия, позволяющая определить максимум плотности в центре сжимающегося слоя.

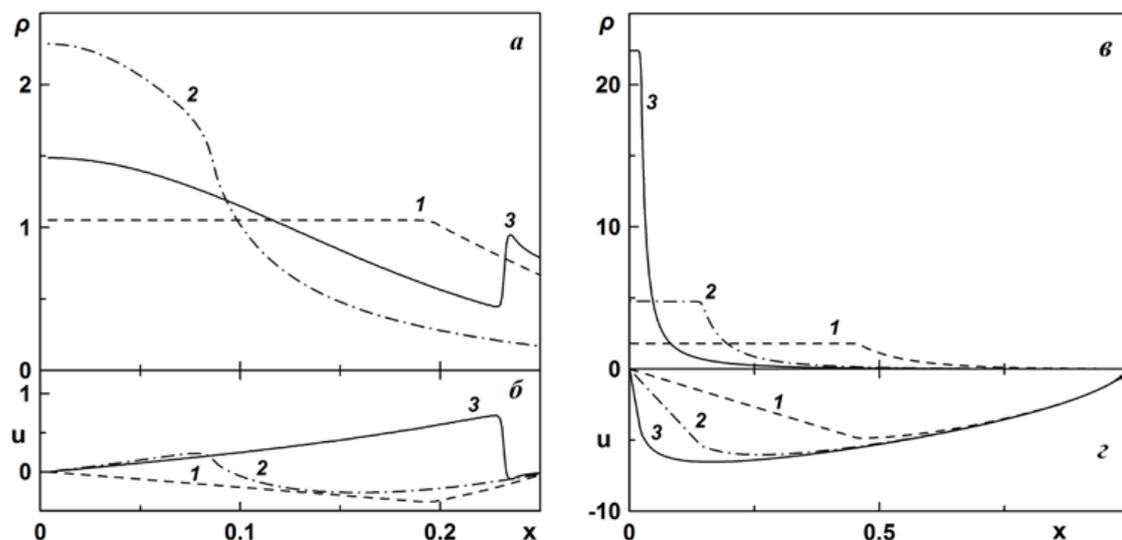


Рис. 1.1 Распределение плотности (а, в) и скорости (б, г) при изотермическом сжатии слоя $h/\lambda_J = 0.25$ (а, б): 1 - 3 - $t_c/\lambda_J = 0.05, 0.25, 0.5$; $h/\lambda_J = 1$ (в, г): 1 - 3 - $t_c/\lambda_J = 0.15, 0.2, 0.22$. Плотность отнесена к начальному значению ρ в слое, а скорость – к скорости звука c .

Рассмотрено влияние граничных условий на характеристики движения. Показано, что изменение плотности в центре сферы при наличии контактного разрыва существенно больше, чем в его отсутствие. Исследовано действие давления окружающей среды на слой. В случае, когда давление во внешней среде превышает давление в слое, внутрь слоя распространяется ударная волна. Путем численных расчетов определены возрастание плотности за фронтом ударной волны и соответствующее уменьшение длины Джинса. Тем самым подтверждены качественные выводы о том, что ударные волны могут стимулировать процессы фрагментации среды. Для астрофизических приложений полученные результаты означают, что в межзвездной среде при весьма разнообразных физических условиях возможно присутствие очень плотных сгустков веществ, не находящихся в гравитационном равновесии.

Арафайлов С.И., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р. Одномерное сжатие ограниченных объемов самогравитирующего газа. Журнал Изв. РАН, Механ. жидкости и газа (принята в печать).

Отв.: Краснобаев К.В. д.ф.-м.н., 333-4188, kvk-kras@list.ru

Тагирова Р.Р., к.ф.-м.н., 333-4188, tarenata@rambler.ru

2.14. Моделирование движения неоднородных самогравитирующих газовых слоев и сферических оболочек в межзвездной среде (ИКИ)

В нелинейной постановке исследована эволюция малых начальных возмущений плотности в сжимающемся самогравитирующем газе. Рассмотрено сжатие плоских слоев, сферического объема, газовой оболочки. Особенность моделирования заключается в неоднородности и нестационарности основного течения.

Установлено, что возмущения с масштабами, меньшими длины Джинса λ_J , не только не затухают, но их относительная амплитуда может даже увеличиваться. Если длина волны возмущений порядка или превышает λ_J , то возмущения нарастают. Однако характерное время роста меньше времени перехода к режиму быстрого сжатия. В результате не происходит разбиения газа на плотные сгустки, разделенные областями низкой плотности. Значительно большее различие между минимальной и максимальной плотностями имеет место при развитии возмущений в оболочке.

На основе разработанной авторами двухфронтной модели распространения ионизационно-ударного фронта получены следующие результаты.

- Начальное возмущение параметров газа приводит к возникновению неоднородностей в плотном слое между фронтами. Происходит также смещение фронтов относительно их невозмущенного положения. В зависимости от рассматриваемой модели движения – «обжатие» неоднородности I-S фронтом, расширение области III, продвижение I-S фронта вглубь облака – комплекс разрывов смещается соответственно в сверхзвуковой поток, в направлении ионизованного газа или это смещение вообще невелико.

- При фиксированном расстоянии между фронтами на величину неоднородностей и смещение разрывов оказывает значительное влияние эффективность охлаждения газа за фронтом ударной волны. С уменьшением эффективности охлаждения роль самогравитации возрастает.

- С увеличением расстояния между фронтами возрастает масса заключенного в плотном слое вещества. Вследствие этого возрастают и силы взаимного притяжения между частицами среды. При этом возмущения плотности сопоставимы с плотностью в невозмущенном слое.

Выполненные расчеты позволяют полагать, что установление равновесия между фронтами сопровождается сильными колебаниями параметров среды и возникновением неоднородной структуры плотного слоя газа. Таким образом, известные в литературе модели, состояния гравитационного равновесия, нуждаются в существенной модификации.

Арафайлов С.И., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р. Неустановившееся одномерное сжатие ограниченного объема самогравитирующего газа. Материалы научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция механики. Ноябрь 2011. С. 77.

К.В. Краснобаев, Р.Р. Тагирова. «Гравитационное сжатие неоднородного газового слоя (сферы) под воздействием давления внешней среды». Материалы Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЭА-2011)». 2011.

Отв.: Краснобаев К.В. д.ф.-м.н., 333-4188, kvk-kras@list.ru

Тагирова Р.Р., к.ф.-м.н., 333-4188, tarenata@rambler.ru

2.15. Ретроспективный анализ методов предсказания солнечных протонных событий на основе использования данных глобальной сети нейтронных мониторов в реальном времени (ИКИ, НИИЯФ МГУ)

Результаты применения опубликованных методов для предупреждения о приходе к Земле потоков протонов с энергией ~10-100 МэВ после мощных эруптивных событий на Солнце были проверены путем сравнения со спутниковыми наблюдениями в 2001-2006 гг. Более 50% от числа событий оказались пропущенными при таком способе прогнозирования. Сделан вывод о необходимости привлечения дополнительной информации о состоянии солнечной и гелиосферной активности для повышения надежности кратковременных прогнозов названными методами.

И.С. Веселовский, О.С. Яковчук, О прогнозе солнечных протонных событий по данным наземных нейтронных мониторов. *Астрономический Вестник* 2011, Т. 45, №4, С. 365-375.

Отв.: Веселовский И. С., д.ф.-м.н., проф., т. 939-1298, veselov@dec1.sinp.msu.ru

2.16. Прогнозирование полного 24 –ого цикла солнечной активности несколькими вариантами авторегрессии и методом предвестника (ИКИ, ИЗМИРАН)

Официальный прогноз в соответствии с решением Третьей официальной комиссии по предсказанию циклов солнечной активности, созданной НАСА и НОАА, а также Международной службой охраны окружающей среды, показал, что существует значительный разброс результатов и пока нет единого мнения о величине амплитуды и времени наступления максимума. Приводятся два различных варианта – R_z (число Вольфа - солнечных пятен) = 90 и август 2012 года, соответственно, или $R_z = 140$ и октябрь 2011 года.

В данной работе пересмотрен прогноз 24 – ого цикла при помощи сравнительного анализа, основанного на различных вариантах сингулярного спектрального прогноза, нелинейном прогнозе с использованием нейронной сети, а также методе предвестника. В качестве предвестника использовалась динамика солнечных магнитных полей, формирующих солнечные пятна, индексом которых являются числа Вольфа. Предсказание, основанное на использовании нейросетевого подхода, дало значение амплитуды максимума 24–ого цикла равное 70. В соответствии с двумя предшествовавшими работами, использовавшими нейросетевой подход, (McPherson et al., 1995, Fessant, Pierret, Lantos, 1996), амплитуда максимума 24 цикла оказывалась порядка 145. Предсказание в данной работе, основанное на методе предвестника, дало значение амплитуды 50 и время наступления максимума в апреле 2012. С учетом того, что прогноз методом предвестника делался по усредненным за 4,4 года данным, амплитуда максимума может быть на 20-30 % выше, порядка 60 -70, то есть близкой к значениям, предсказанным нейросетевым методом. Затянувшийся минимум 23 цикла и предсказанные низкие значения максимума 24 –ого цикла напоминают сценарий поведения солнечной активности в историческом Далтоновском минимуме.

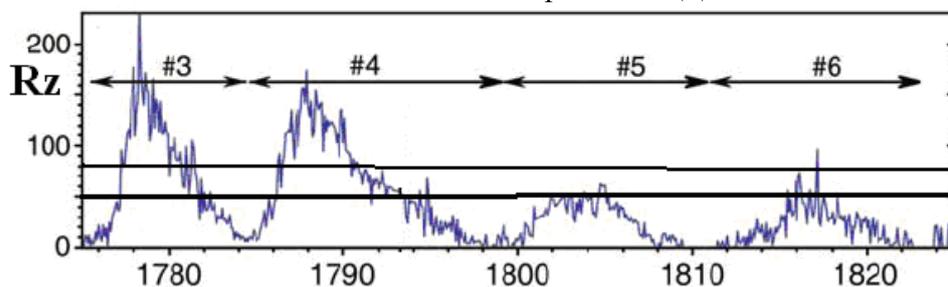


Рис.1. Числа Вольфа R_z в период циклов 3, 4, 5 и 6, соответствующих вхождению солнечной активности в далтоновский минимум. Черными уровнями отмечены величины R_z для предсказанного нами 24-го цикла (см. Рис.2)

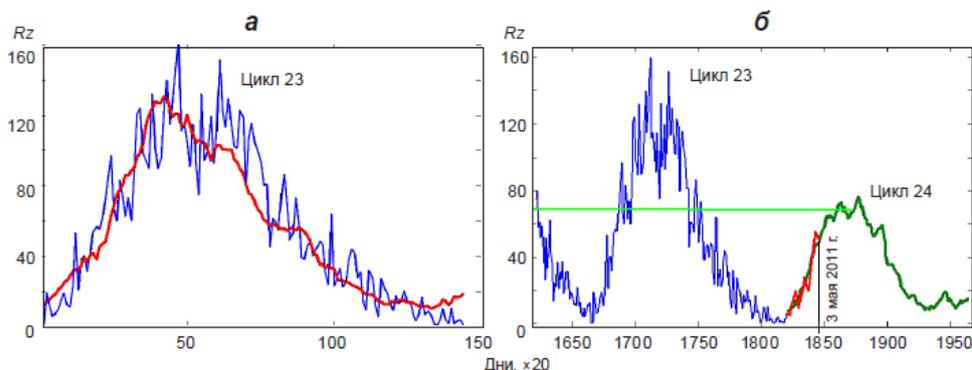


Рис.2. Итеративный прогноз 23-го и 24-го циклов с помощью нейросетевого метода. Синие кривые на а и б – реальные значения R_z для 23-го цикла; красные кривые на а и б – прогноз 23-го цикла (а) и реальные отсчеты R_z начальной фазы 24-го цикла (б); зеленая кривая на б – прогноз 24-го цикла

Ожередов, В.А., Бреус Т.К., Обридко В.Н. Прогнозирование полного 24-го цикла солнечной активности несколькими вариантами авторегрессии и методом предвестника// Геофизические процессы и биосфера, 2011, т. 10, № 3, с. 51–65.

Отв.: Ожередов В.А., к.ф.-м.н., вед.мат. Отд.54, 333-3012, ojymail@mail.ru,
Бреус Т.К. д.ф.-м.н. гл.н.с. отд 54, 333-3012, breus36@mail.ru

2.17. Иерархический подход к прогнозированию рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра (НИИЯФ МГУ + ИКИ)

Одновременное использование изображений Солнца в различных линиях спектра, полученных с нескольких космических аппаратов, в сочетании с новыми алгоритмами обработки данных позволило добиться более высокой точности и надежности прогноза скорости солнечного ветра в период роста солнечной активности. Использовались данные о суточных значениях площадей корональных дыр, рассчитанные по изображениям Солнца в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, а также информация об измеренной скорости потоков солнечного ветра за предыдущие обороты Солнца. Площади корональных дыр рассчитывались по изображениям, полученным прибором SWAP со спутника PROBA2 в спектральном диапазоне с центром на длине волны 17.4 нм и прибором AIA с космического аппарата SDO с центром на длинах волн 19.3 нм и 17.1 нм. Для прогноза были взяты данные за 2010 год, период роста 24-го цикла солнечной активности. На первом уровне иерархии было получено несколько простых модельных оценок скорости потоков на основе входных данных каждого типа. На втором уровне иерархии из полученных оценок формировался окончательный прогноз скорости солнечного ветра на 3 дня вперед. Предложенный иерархический подход позволяет повысить точность прогноза скорости солнечного ветра. Кроме того, при такой методике прогнозирования пропуски в данных одного космического аппарата не оказывают критического влияния на конечный результат прогнозирования всей системы в целом.

Ю.С. Шугай, И.С. Веселовский, Д. Б. Ситон, Д. Бергманс, Иерархический подход к прогнозированию рекуррентных потоков солнечного ветра. *Астрономический Вестник* 2011, Т. 45, №6, С. 560-571.

Отв.: Веселовский И.С., д.ф.-м.н., проф., т. 939-1298, veselov@decl.sinp.msu.ru

2.18. Исследование частоты появления различных межпланетных драйверов магнитных бурь, их геоэффективности (вероятности) и эффективности генерации бурь (соотношение между «выходом» и «входом» физического процесса). (ИКИ)

Исследуется относительная роль разных типов течений солнечного ветра в генерации магнитных бурь. На основе данных межпланетных измерений базы OMNI за период 1976-2000 г анализируются 798 магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТ и их межпланетные источники: коротирующие области взаимодействия (CIR), межпланетные CME (ICME), включающие магнитные облака (MC), поршни (Ejecta) и области сжатия перед ними (Sheath). Для разных типов солнечного ветра исследуются следующие относительные характеристики: частота появления; потоки массы, импульса, энергии и магнитный поток; вероятность генерации магнитной бури (геоэффективность) и эффективность процесса генерации бури. Полученные результаты показывают, что несмотря на то, что магнитные облака имеют более низкую частоту появления и более низкую эффективность, чем CIR и Sheath, они играют существенную роль в генерации магнитных бурь, благодаря более высокой геоэффективности генерации магнитной бури (т.е. более высокой вероятности содержать большую и продолжительную южную компоненту $B_z < 0$ ММП).

Yermolaev, Yu. I.; Nikolaeva, N. S.; Lodkina, I. G.; Yermolaev, M. Yu. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, Sheath and ICME in generation of magnetic storms, препринт, <http://arxiv.org/abs/1109.1073> 2011 (представлено в Journal of Geophysical Research)

Николаева Н.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений // Геомагнет. и Аэронав. №1. 2011. том 51. № 1. С. 51–67.

Отв.: Николаева Н. С., к.ф.-м.н., с.н.с., 333-11-78, nnikolae@iki.rssi.ru
Ермолаев Ю. И., д.ф.-м.н., зав.лаб., т.333-13-88, yermol@iki.rssi.ru

2.19. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений (ИЗМИРАН)

2.19.1. По данным солнечных рентгеновских спектров (слабые линии гелиоподобных ионов Cl, CL xvi в диапазоне длин волн 4.44-4.50 Å), полученных прибором РЕСИК/КОРОНАС-Ф во время вспышек 2002-2003 г., определено содержание элемента хлора в солнечной короне ($A(Cl) = 5.75 \pm 0.26$), которое является наиболее точным из всех полученных ранее. Оно в 1.8 и 2.7 раза выше значений полученных по данным, соответственно, инфракрасного спектра пятен и для областей Hii. Установленное постоянство значений содержания хлора по большому спектру вспышек свидетельствует о его независимости от степени активности, т.е. отражает истинное содержание в солнечной короне.

B.Sylwester, Kenneth J. H. Phillips, J.Sylwester, V.Kuznetsov. The Solar Flare Chlorine Abundance from RESIK X-ray Spectra. *Astrophys. J.*, 738, 49, 2011.

2.19.2. Изучена незавершенная (или ограниченная) эрупции магнитного жгута по наблюдениям наземных и космических обсерваторий. Показано, что эрупция была остановлена стабилизирующим действием коронального магнитного поля, о наличии которого можно судить по устойчивым корональным структурам, наблюдаемым над жгутом в ультрафиолетовых линиях железа и Ha. В достаточно сложном корональном магнитном поле могут существовать два или несколько устойчивых положений равновесия жгута, и ограниченная эрупция означает переход из одного положения равновесия в другое.

Kumar P., Srivastava A.K., Filippov B., Erdelyi R., Uddin W., Multiwavelength Observations of a Flux Rope Failed in the Eruption and Associated M-class Flare from NOAA AR 11045, Solar Physics, 272, 301-317, 2011.

2.19.3. На основе результатов комплексного анализа многоволновых данных (рентгеновское и гамма-излучение, оптические наблюдения, данные об энергичных солнечных протонах) в 2010-2011 гг. разработана новая топологическая модель магнитного поля в короне Солнца (магнитная ловушка – «пробкотрон») и новый сценарий событий типа 23 июля 2002 г. Получены указания на возможность ускорения частиц (ионов) вихревым электрическим полем в корональных арках быстрого СМЕ до энергий ~10-100 МэВ с достаточно мягким спектром (показатель $\geq 4-5$). Этот результат позволяет объяснить особенности генерации гамма-излучения в данной вспышке на основе учёта взаимодействий ускоренных и фоновых ядер в атмосфере Солнца. Как следствие модели, гамма-источник в линиях возбуждения (~4.1-6.7 МэВ) должен совпадать с областью взаимодействия (удержания) ускоренных частиц, а источник вторичных нейтронов вблизи лимба оказывается более эффективным, чем на диске. Последний вывод важен для изучения экстремальных событий типа вспышки 29 сентября 1989 г.: хотя собственно вспышка произошла за W-лимбом, линия захвата нейтрона водородом в фотосфере с энергией 2.223 МэВ была уверенно зарегистрирована на борту околоземного КА SMM..

Г.Н. Кичигин, Л.И. Мирошниченко, В.И. Сидоров, С.А. Язев. Магнитная топология солнечных гамма-вспышек и динамика ускоренных ионов. – Письма в АЖ, 2011.

2.20. Связь явлений в межпланетной плазме со структурой и динамикой солнечной короны (ИЗМИРАН)

2.20.1. С помощью техники вэйвлет-анализа был предпринят поиск осцилляций потока ГКЛ, числа солнечных пятен SS и коронального индекса CI, эволюция которых могла бы служить предвестником GLE. Из общего числа 70-ти GLE, зарегистрированных в 1942-2006 гг., для анализа были отобраны четыре выдающихся события - 23 февраля 1956 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г. На их примере показано, что по мере приближения дня события GLE частота осцилляций ГКЛ уменьшается. Изучены также характеристики общих осцилляций потоков ГКЛ и СКЛ внутри временного интервала отдельного GLE.

Особый интерес представляют вариации частоты GLE η в зависимости от уровня SA на различных стадиях солнечного цикла. Частота регистрации GLE составляет $\eta \sim 1$ год⁻¹, причём эта величина испытывает большие флуктуации в течение отдельного цикла SA. В частности, подтверждена известная тенденция событий GLE группироваться, в основном, на восходящей и нисходящей ветвях солнечного цикла. Такая тенденция, по-видимому, обусловлена особенностями пространственно-временной динамики ГМП Солнца. Накопленная статистика (70 GLE за период 1942-2006 гг.) позволяет поставить вопрос о связи между частотой событий СКЛ, характеристиками солнечного цикла и инверсиями ГМП. Наземные возрастания СКЛ по существу являются запрещенными во время переходной фазы цикла, когда происходит изменение знака ГМП. Результаты анализа частоты GLE представляют интерес для понимания эволюции глобального и локальных магнитных полей Солнца в 11-летнем цикле солнечных пятен и его 22-летнем магнитном цикле.

Л.И. Мирошниченко, Х.А. Перес-Пераса, В.М. Веласко-Эррера, Х. Запотитла и Э.В. Вашенюк, Осцилляции галактических космических лучей и солнечных индексов перед приходом релятивистских протонов от Солнца. - Геомагнетизм и аэрономия, 2011, т.51, принято к печати.

2.20.2. Произведено моделирование процессов ускорения частиц при магнитном пересоединении гелиосферного токового слоя (ГТС) в кинетическом приближении particle-in-cell (PIC) и выполнено сравнение полученных результатов с данными WIND по

пересечению ГТС на 1 а.е. [1, 2]. На базе анализа поведения компонент межпланетного магнитного поля (ММП), плотности, скорости солнечного ветра и спектрограмм распределения электронов по питч-углам показано, что:

1) Случаи несовпадения определения положения секторных границ по энергичным электронам и по магнитному полю (подробно рассмотренные Crooker et al., 2004) являются следствием формирования облака отраженных электронов на расстоянии D от секторной границы, равном 2-10 гирорадиусам протона (D зависит от соотношения компонент ММП в ближайшей окрестности области пересоединения). Экспериментальные данные подтверждают результат моделирования, а также медальоно- или подковообразную форму облака электронов, неспособных достичь секторной границы (Рисунок 1). Таким образом объясняется давнее противоречие в области экспериментального наблюдения секторных границ. Налицо необходимость определения положения секторных границ множественными методами - как по магнитному полю, так и по энергичным электронам.

2) Асимметричное поведение скорости солнечного ветра при пересечении секторных границ [3], не нашедшее объяснение в работах предшественников, вероятно, есть следствие движения протонов вдоль поляризационного поля, индуцированного ускоренными протонами и электронами, разделёнными по обе стороны секторной границы.

3) Изрезанный профиль плотности с паразитными максимумами плотности вокруг главного, приходящегося на пересечение секторной границы, успешно моделируется с учетом вклада транзитных протонов и ионов, ускоренных на секторной границе. Этот эффект, возможно, ответственен за повышение числа резких скачков протонов в окрестности секторных границ [3].

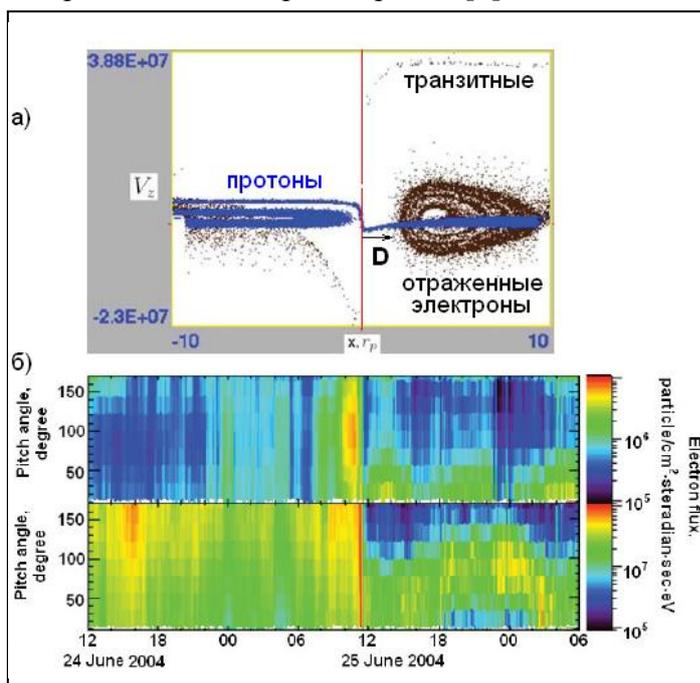


Рис. 1. а) Пример результатов моделирования поведения частиц в фазовом пространстве «расстояние от секторной границы - скорость». Протоны - синий цвет, электроны - черный. Расстояние X дано в гирорадиусах протона. D - расстояние до медальонообразного облака отраженных электронов.

б) Спектрограмма питч-углов электронов с энергиями 84эВ (сверху), 27эВ (снизу). Смена направления движения электронов детектируется в канале 84эВ (suprathermal electrons) раньше пересечения секторной границы. На обеих панелях видны половинки медальонообразных облаков отраженных электронов (питч-угол показан в полуплоскости).

Valentina V. Zharkova and Olga Khabarova. Particle acceleration in the reconnecting heliospheric current sheet: solar wind data versus 3D PIC simulations. Submitted to ApJ, 2011.

V. Zharkova, O. Khabarova. Evidences of large-scale magnetic reconnection along the heliospheric current sheet SOLAIRE meeting 9-13 May, 2011 Teistungen, Germany https://www.mps.mpg.de/meetings/solaire2011/contents/abstracts/pdf/abstracts_0017.pdf

O.Khabarova, G.Zastenker, Sharp changes in solar wind ion flux and density within and out of current sheets. Sol. Phys., 2011, 270(1), 311-329

3. Показано, что созданная в ИЗМИРАНе база данных по Форбуш-эффектам и межпланетным возмущениям достаточно велика и представительна, чтобы обеспечить сравнительный статистический анализ событий различных типов. По всем событиям 1997-2009 гг. проведён сравнительный анализ событий начинающихся вместе с внезапным началом геомагнитной бури (SSC) и событий без SSC. Выборки событий с внезапным началом (S-группа) и с постепенным началом (NS-группа) существенно различаются между собой. В S-группе оказались в среднем более мощные события (рис. 1). Межпланетные возмущения двух групп различаются и по структуре.

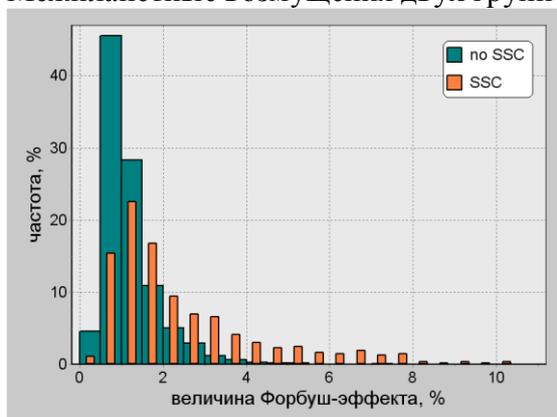


Рис. 1. Распределения величин Форбуш-эффектов для групп событий с SSC и без SSC.

Межпланетные возмущения, относящиеся к S-группе, эффективнее модулируют космические лучи и создают большие Форбуш понижения по сравнению с возмущениями NS-группы, имеющими сходные характеристики. Одним и тем же уровням геомагнитной активности в NS-группе соответствуют Форбуш понижения меньшей величины, чем в S-группе (рис.2).

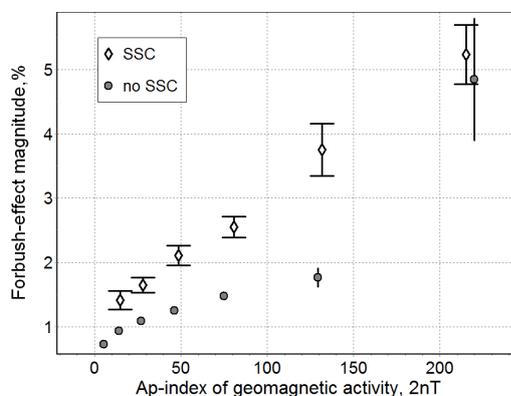


Рис. 2. Зависимость величины ФЭ от Ap-индекса геомагнитной активности для групп событий с SSC и без SSC (проведено усреднение для событий с близкими уровнями геомагнитной активности).

Полученные результаты говорят в пользу того, что в выделенных группах преобладают разные механизмы модуляции галактических космических лучей. События S-группы в большей мере обусловлены выбросами солнечного вещества (СМЕ), в то время как значительная часть событий группы NS связана с высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.

Отв.: Белов А.В., Янке В.Г., Ерошенко Е.Г., Гущина Р.Т.

2.21. Связь явлений в межпланетной плазме со структурой и динамикой солнечной короны (ПРАО ФИАН, ИРЭ)

В течение года на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц в режиме мониторинга проводились наблюдения межпланетных мерцаний радиоисточников. Ежедневно в течение 24 часов регистрировались флуктуации потока излучения нескольких сотен источников с мерцающим потоком более 0,2 ян, попадающих в 16-лучевую диаграмму радиотелескопа. Отрабатывались различные варианты методики обработки и анализа данных, характеризующих статистический ансамбль источников. Готовится к печати работа, содержащая результаты, характеризующие динамику глобальной структуры турбулентного солнечного ветра в 23/24 циклах солнечной активности в период с 2007 по 2011 годы.

По данным экспериментов радиопросвечивания солнечного ветра сигналами космического аппарата Mars Express, выполненных в 2004 г., во внутреннем солнечном ветре нами были обнаружены возмущения плотности квазипериодического характера. В 2010-2011 гг. Был проанализирован большой объем данных экспериментов с космическими аппаратами Ulysses, Galileo, Mars Express, Venus Express, Rosetta, относящийся к длительному периоду с 1991 по 2009 г. Во всех сериях наблюдений вво временных спектрах флуктуаций частоты радиосигналов были обнаружены квазипериодические возмущения [10]. Уровень спектральной плотности квазипериодической составляющей примерно в три раза превышает уровень степенного фона. Характерная частота квазипериодических возмущений составляет в среднем 4 мГц, что соответствует периодам около 4 мин. Ширина спектральных линий квазипериодических возмущений соответствует длительности событий около 30-40 мин. Квазипериодические возмущения наблюдаются в диапазоне гелиоцентрических расстояний от 3 до 40 радиусов Солнца, причем зависимость характерных параметров возмущений от локальных условий в солнечном ветре не обнаружена: возмущения присутствуют около 20 % времени как на низких, так и на высоких гелиоширотах при различных уровнях солнечной активности. В ряде случаев наряду с основной частотой наблюдаются возмущения на второй гармонике. Наблюдаемые квазипериодические флуктуации частоты просвечивающих сигналов связаны, по-видимому, с магнитозвуковыми волнами, возбуждаемыми локально при нелинейных взаимодействиях альвеновских волн 5-минутного диапазона, распространяющихся из основания солнечной короны ([10]). Выполненный в [7] вэйвлет-анализ измерившихся в экспериментах радиопросвечивания флуктуаций частоты подтверждает присутствие квазипериодических возмущений с найденными в [10] характерными параметрами.

Проанализированы данные экспериментов радиопросвечивания солнечного ветра космического аппарата Mars Express сигналами, выполненных с 25 августа по 22 октября 2004 г. в условиях низкой солнечной активности. В экспериментах с частотой съема информации 1 с. измерялись флуктуации частоты и амплитуды когерентных радиосигналов S- и X- диапазонов. Получены радиальные зависимости дисперсии флуктуаций частоты; получены временные спектры флуктуаций логарифма амплитуды для обоих диапазонов в интервале флуктуационных частот 0,01 Гц – 0,5 Гц. Данные относятся к низкоширотному солнечному ветру. ([9])

Многочисленные локальные измерения показывают, что во внешней гелиосфере функция распределения ионов в области энергий за пределами границы инжекции подхваченных ионов (~ 1 имеет протяженный надтепловой хвост, который как правило описывается степенной функцией с показателем степени в пространстве скоростей $-6 \leq \gamma \leq -4$. Ранее было показано, что высокоэнергичный хвост не может быть объяснен диффузионными процессами, связанными с механизмом Ферми 2 рода, поскольку уровень как альвеновской, так и магнитозвуковой турбулентности оказывается недостаточным. Предложен механизм ускорения ионов, связанный с многократным прохождением

разрывов скорости ветра. Показано, что этот механизм в среднем приводит к ускорению частиц, причем процесс ускорения носит диффузионный характер, а коэффициент диффузии в пространстве скоростей пропорционален квадрату скорости. Решение транспортного уравнения при учете диффузии, конвекции, охлаждения в неоднородном магнитном поле и инжекции подхваченных ионов позволяет получить распределение по скоростям с показателем степени $\gamma \approx -5$, который близок к наблюдаемому ([11]).

Выполнен анализ усредненных по годовым интервалам измерившихся радиоастрономическим методом параметров солнечного ветра (скорости плазмы и индекса мерцаний) за период с 1966 г. по 2009 г. [8]. На фоне 11-летних циклических вариаций выявлен примерно линейный тренд, растущий как для индекса мерцаний, так и для скорости. Долговременный тренд, возможно, связанный с 80-летней циклическостью качественно отличается от 11-летних вариаций, для которых имеется антикорреляция между изменениями скорости и индекса мерцаний.

Обнаружено, что при просвечивании турбулентного солнечного ветра естественными радиоисточниками на гелиоцентрических расстояниях менее 0,5 а.е. наблюдаются сравнительно медленные, масштабы порядка 10 с, вариации интенсивности. По-видимому, эти вариации не связаны с влиянием земной ионосферы, а представляют собой проявление рефракционных мерцаний [7].

Глубокова С.К., Глянецв А.В., Тюльбашев С.А., Чашей И.В., Шишов В.И. Межпланетные мерцания сильных радиоисточников на фазе спада вблизи минимума 23 цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т.51. №6. С.1-6. 2011 (Geomagnetism and aeronomy. V.51. No.6. P.794-799)

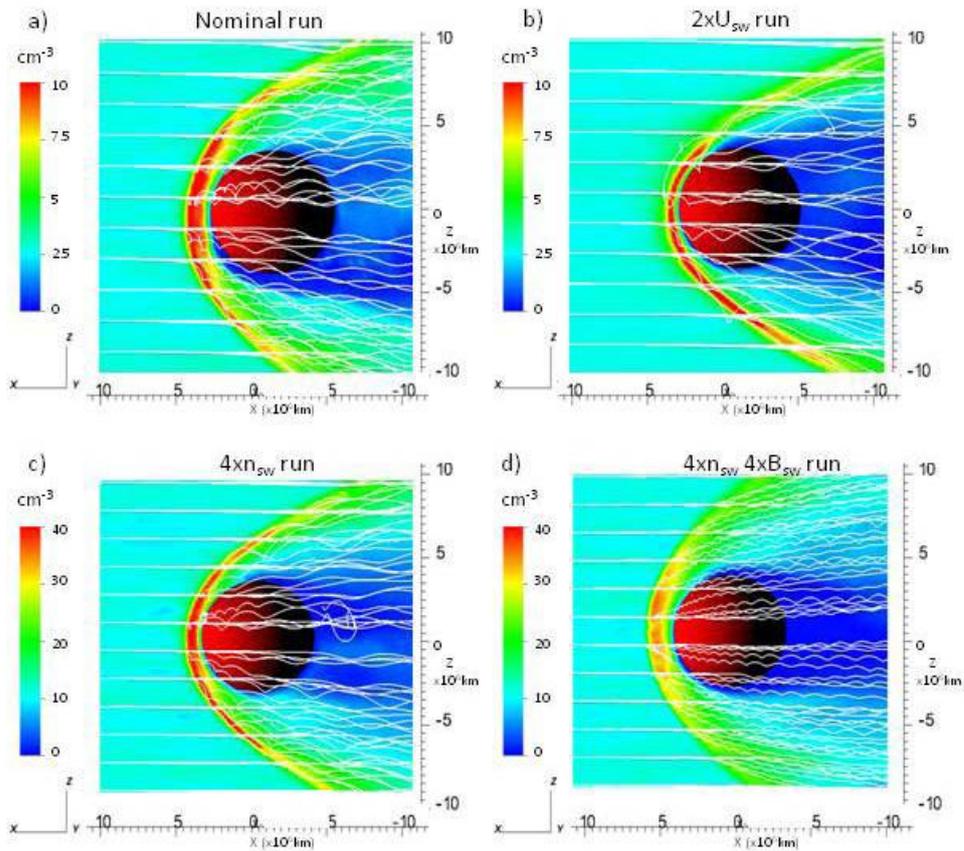
А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, А.И. Рогашкова, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К.Бёрд, М. Петцольд. Наблюдения квазипериодических возмущений в околосолнечной плазме по данным двухчастотного радиозондирования сигналами космических аппаратов // Радиотехн. и электрон. Т.56. №12. 2011. С.1433-1443

В.И. Власов. Долговременные изменения солнечного ветра в 20-23 циклах солнечной активности по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэронавигация. Т.51. №1. С.30-40

Ефимов А.И., Луканина Л.А., Рудаш В.К., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Особенности распространения когерентных радиоволн через околосолнечную плазму в период низкой солнечной активности. Труды 23 Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» Йошкар-Ола., 23-26 мая 2011. Сб. Трудов. Т.1. С.169-199

2.22. Моделирование особенностей распределения энергичных протонов в области взаимодействия солнечного ветра с Марсом (ИКИ)

Проведено моделирование взаимодействия солнечного ветра с Марсом с целью интерпретации экспериментально наблюдавшегося прибором СЛЕД на КА «Фобос-2» магнитного затенения при обтекании планеты солнечным ветром. Для вычислений тестовых частиц использовалась 3-D самосогласованная гибридная модель НУВ-Mars. Показано, что магнитное затенение зависит от скорости и плотности солнечного ветра и от величины и направления межпланетного магнитного поля.



На рисунке показано движение H^+ ионов солнечного ветра для 4 случаев: (а) номинальный прогон для скорости $U_{sw} = 485 \text{ км с}^{-1}$, $N_{sw} = 2.7 \text{ см}^{-3}$, $IMF = [-1.634, 2.516, 0] \text{ нТ}$, (б) скорость $2 \times U_{sw} = 970 \text{ км с}^{-1}$, $N_{sw} = 2.7 \text{ см}^{-3}$, $IMF = [-1.634, 2.516, 0] \text{ нТ}$, (с) плотность $= 4 \times N_{sw} = 10.8 \text{ см}^{-3}$, $U_{sw} = 485 \text{ км с}^{-1}$, $N_{sw} =$, $IMF = [-1.634, 2.516, 0] \text{ нТ}$ и (д) $4 \times N_{sw}$, $4 \times IMF$ для $U_{sw} = 485 \text{ км с}^{-1}$, $N_{sw} = 10.8 \text{ см}^{-3}$, $IMF = [-6.536, 10.064, 0] \text{ нТ}$. Тестовые частицы с начальной температурой 0 К генерировались вблизи плоскости $x = 10\,000 \text{ км}$ на сетке 15 (в направлении y) \times 15 (в направлении z) grid. Цветом в плоскости $y = 0$ меридиана полдень-полночь показана полная плотность протонов. Белые линии – итраектории тестовых частиц. Темно-синяя область за планетой – область пониженной концентрации H^+ является “SW-flow shadow”.

McKenna-Lawlor, S., E. Kallio, R. Jarvinen and V. V. Afonin, Magnetic shadowing of high energy ions at Mars: SLED/Phobos-2 observations and hybrid model simulations, Earth Planets and Space, 2011, *accepted*.

Отв.: Афонин В.В., к.ф.-м.н., в.н.с., vafonin@iki.rssi.ru

3. Динамика магнитосфер Земли и планет

3.1. Построена новая модель магнитопаузы, применимая при больших значениях межпланетного магнитного поля (ИКИ)

Показано, что наблюдения магнитопаузы спутниками серии Прогноз могут быть описаны следующей двухмерной моделью:

$$X(Y) = r_0 - \frac{D^2}{2\pi^2 R_0} \tan^2\left(\frac{\pi Y}{D}\right),$$

где X – геоцентрическое расстояние в направлении прихода аберрированного солнечного ветра, Y – в перпендикулярном этому направлении, $r_0=16.11ReP^{1.6}$ – расстояние до магнитопаузы в подсолнечной точке, $R_0=51.16ReP^{1.6}$ – радиус кривизны магнитопаузы в этой точке, $D=98.06ReP^{1.6}$ – асимптотический диаметр геомагнитного хвоста, и P – суммарное тепловое и магнитное давление в магнитошите у магнитопаузы. Это давление может быть оценено с использованием динамического давления солнечного ветра $V\rho^2$ как

$$P = k\rho V^2 \left(1 + \frac{4\text{Sin}^2\vartheta_{bv}}{kM_a^2} + \frac{4\text{Sin}^2\vartheta_{bv}}{kM_a^2} \sqrt{1 + \frac{kM_a^2}{2\text{Sin}^2\vartheta_{bv}}} \right),$$

где $k \approx 0.88$, Ma – Альвеновское число Маха в солнечном ветре и ϑ_{bv} – угол между его направлением и вектором межпланетного магнитного поля. Такая модель хорошо описывает перемещение магнитопаузы вплоть до геостационарной орбиты $\sim 6.6Re$.

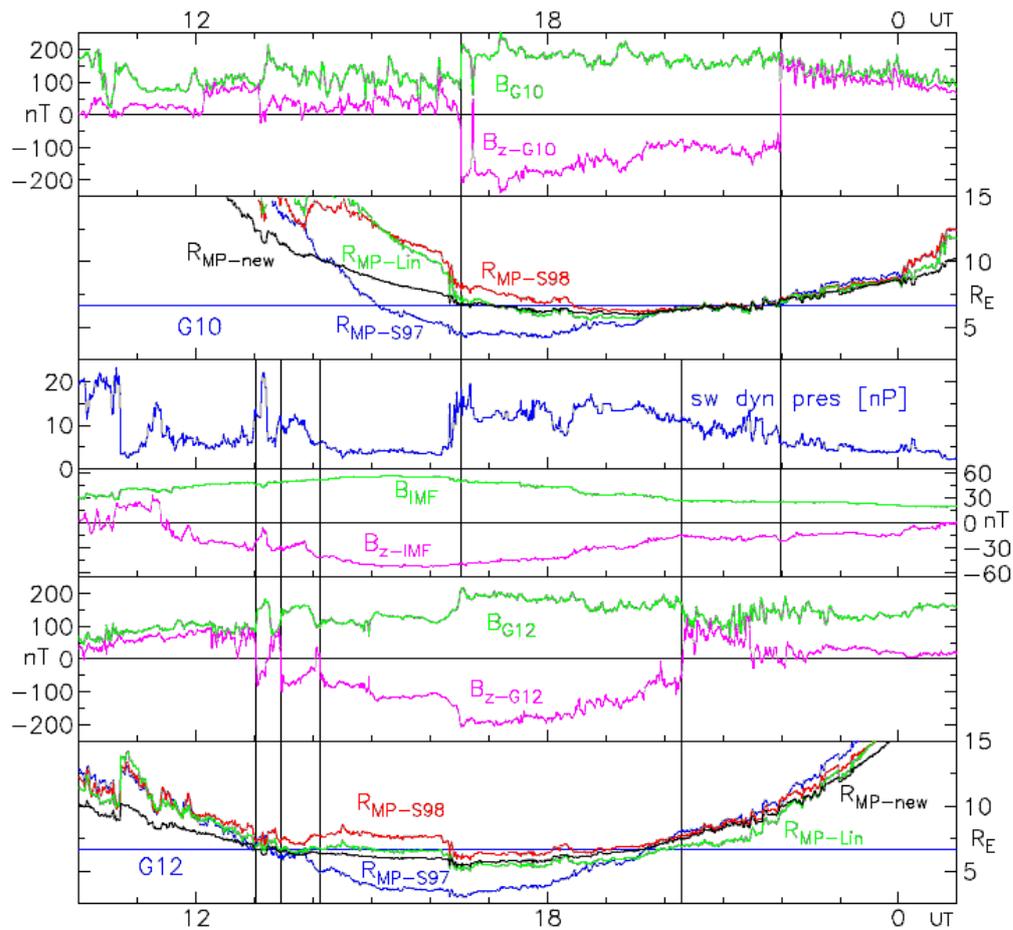


Рис. На второй сверху и последней панели рисунка тонкими черными линиями показано расстояние до магнитопаузы по этой модели в направлении геостационарных спутников GOES 10 и GOES 12, соответственно. Горизонтальные голубые линии соответствуют положению этих спутников, а вертикальные черные – моментам пересечения ими магнитопаузы. Как можно видеть прогнозы новой модели часто лучше соответствуют наблюдениям, чем предсказания широко распространенных моделей Shue et al. (1998,1997) и Lin et al. (2010).

M. Tátrallyay, G. Erdős, Z. Németh, M. I. Verigin, and S. Vennerström, Multispacecraft observations of the terrestrial bow shock and magnetopause during large geomagnetic storms, *Annales Geophysicae*, 2011.

Отв.: Веригин М.И., д.ф.-м.н., в.н.с., verigin@iki.rssi.ru

3.2. Завершение работы по анализу и интерпретации данных о пучках почти моноэнергетических ионов (ПМИ) в спектрах энергичных частиц (E=30-800 кэВ)

около границ магнитосферы Земли, открытых в эксперименте ДОК-2 (проект Интербол). (ИКИ)

Пучки почти моноэнергетических ионов (ПМИ) перед фронтом околоземной ударной волны, в магнитослое и в плазменном слое хвоста магнитосферы были открыты в эксперименте ДОК-2 (проект Интербол) благодаря рекордно высокому энергетическому и временному разрешению аппаратуры ДОК-2. В спектрах ионов в диапазоне энергий от 30 до 800 кэВ наблюдались от одной до трех узких линий с характерными соотношениями энергий 1:2:(5-6) и средней относительной шириной линий на половине высоты $dE/E=0.25$. Первые результаты изучения отдельных событий, опубликованные в 1999 и 2000 гг., показали, что они не могут быть объяснены обычно используемыми моделями ускорения частиц. В этих работах была предложена модель ускорения ионов во всплесках потенциального электрического поля, возникающих при разрыве волокон токовых слоев в магнитосфере и на ее границах. С тех пор нами был проведен детальный анализ 722 ПМИ событий, обнаруженных за весь 5-летний период работы Интербола-1. В частности, рассмотрены статистика свойств ПМИ, их природа и происхождение. Анализ большого массива новых данных подтвердил предположенные нами ранее идеи о природе, происхождении и модели ускорения ПМИ. Эти идеи были уточнены и получили дальнейшее развитие. Показано, что пучки ПМИ, не наблюдавшиеся до проекта Интербол и не предсказанные теорией, являются весьма распространенным явлением. Установлено, что генерация ПМИ, наблюдавшихся перед фронтом околоземной ударной волны и в магнитослое, происходит при разрыве волокон токового слоя околоземной ударной волны. Причиной разрыва чаще всего являются аномалии горячего течения (НФА), наблюдаемые при пересечении приносимого солнечным ветром токового слоя (тангенциального разрыва) с околоземной ударной волной. Расчет траекторий ионов в области ускорения позволил оценить размеры этой области. Показано, что изучение ПМИ может дать информацию о свойствах и динамике токового слоя ударной волны, которая не может быть получена сейчас другими способами.

V. N. Lutsenko and E. A. Gavrilova, Properties and the origin of Almost Monoenergetic Ion (AMI) beams observed near the Earth's bow shock, *Annales Geophysicae*, Vol. 29, Number 8, Page(s) 1439-1454, 2011/doi:10.5194/angeo-29-1439-2011

Отв.: Луценко В.Н., к.ф.-м. н., т. 333-2000, vlutsenk@iki.rssi.ru

3.3. Продолжены исследования магнитной турбулентности бесстолкновительной плазмы в области внешнего магнитосферного каспа Земли, на основе анализа магнитных и плазменных измерений четырех спутников миссии Кластер в области каспа. (ИКИ)

1. Впервые получены 3-х мерные энергетические распределения турбулентных спектров магнитного поля в пространстве волновых векторов в диапазоне волновых чисел от 0,002 до 0.6 рад/км или длин волн от ~3000 до ~ 10 км вдоль целого участка орбиты Кластера, проходящего через прилежащую к каспу область магнитослоя, магнитопаузы, каспа и начало плазменной мантии. Прослежена их динамика. Найденные распределения в системе отсчета, покоящейся в плазме, анизотропны и, за малым исключением, обладают центральной симметрией. Характер и степень анизотропии зависят от области наблюдения, величины фонового магнитного поля, от плазменного параметра β , а также от угла между средним полем и средним вектором скорости V_0 . На рис. 1 показано распределение, составленное из спектров, полученных для десяти перекрывающихся 90-секундных временных интервалов измерений с последовательным сдвигом окна данных на 4 с. Этот случай относится к магнитослою вблизи магнитопаузы. Здесь наблюдается последовательность анизотропных спектров с $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$, с вращающимися векторами в

области высоких значений волновых чисел вокруг фонового магнитного поля со средней угловой скоростью ~ 50 /сек. В других областях, наряду с похожими, наблюдались большей частью совершенно иные распределения, с другими типами анизотропии, в том числе, с анизотропией, при которой $k_{\perp} \ll k_{\parallel}$, с вращением в разных плоскостях, включая плоскость фонового поля, и т. д.

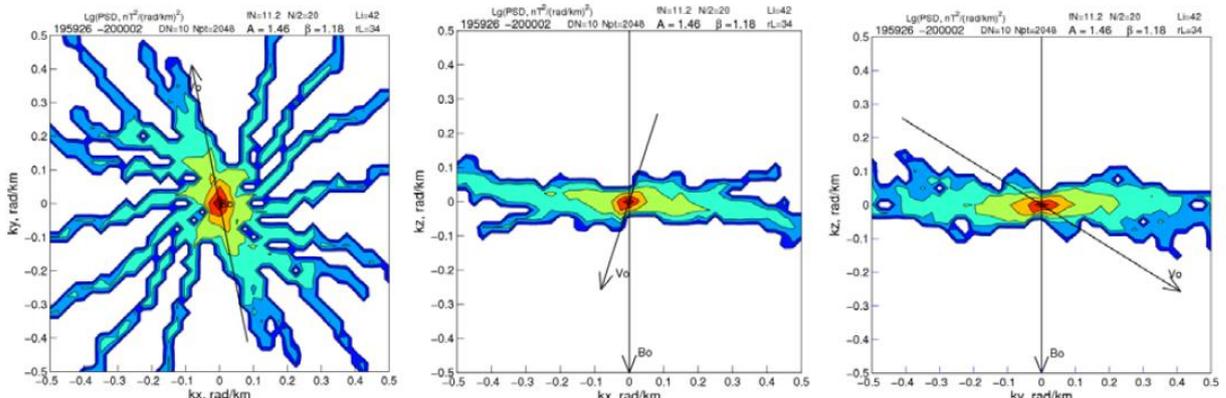


Рис.1 Трехмерное распределение волновых векторов в проекциях на три координатные плоскости, составленное из десяти k -спектров магнитных флуктуаций, полученных по измерениям флуктуаций поля в магнитослое над каспом со сдвигом окна данных в 4 секунды. Использована система координат, в которой ось z направлена по $-B_0$, где B_0 – среднее магнитное поле. Можно видеть: (1) центральную симметрию каждого спектра; (2) анизотропию, при которой $k_{\perp} \gg k_{\parallel}$; (3) вращение коротковолновых частей спектров вокруг B_0 .

2. Найденные k -спектры аппроксимировались степенным законом. Было показано, что каждый спектр в логарифмическом масштабе аппроксимируется одной прямой, наклон которой к оси абсцисс характеризуется одним, относящимся к данному спектру, спектральным индексом. Таким образом, впервые, на основании k -спектров, полученных прямым путем из экспериментальных данных, доказано, что инерционный интервал турбулентности бесстолкновительной плазмы простирается за пределы волновых векторов, соответствующих длинам волн порядка ларморовского радиуса протонов и протонной инерционной длины. На этом основании область диссипации должна находиться на значительно меньших (возможно, электронных) масштабах. Усредненная по 300 спектрам всего интервала наблюдений величина спектрального индекса, по нашим данным, составила величину -1.72 ± 0.15 , очень близкую колмогоровскому значению $-5/3$.

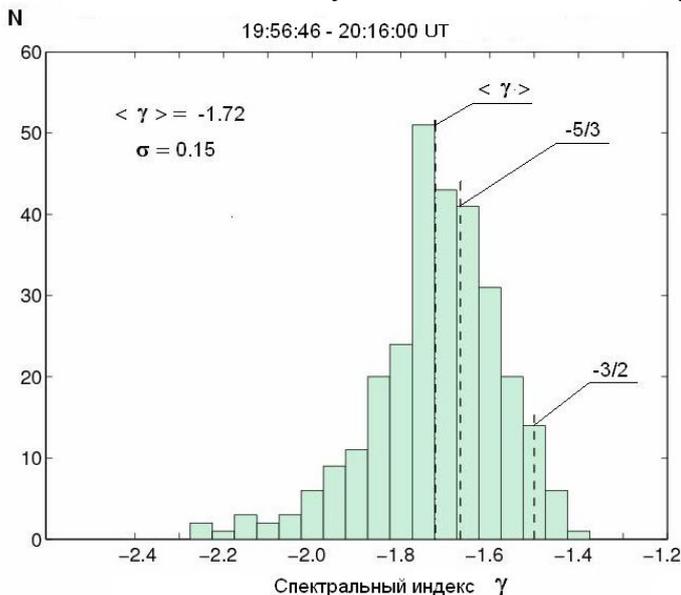


Рис. 2. Гистограмма значений и средняя величина спектрального индекса (в одномерной интерпретации) для 300 инерционных k -спектров магнитных флуктуаций по результатам

обработки измерений четырех спутников Кластера в области каспа и в соседних с ним областях.

С. А. Романов, Магнитная турбулентность в области магнитосферного каспа: степенной закон зависимости энергии от волнового числа, Тезисы доклада на конференции «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ, февраль, 2011 г.

Отв.: Романов С.А., к.ф.-м.н., с.н.с. отдела №54, sroman@mx.iki.rssi.ru

3.4. Регистрация волноводной моды в пространственно ограниченном источнике АКР (ИКИ)

На основе прямых измерений электромагнитного излучения в диапазоне частот 4 кГц – 1 МГц, сделанных на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 при помощи прибора ПОЛЬРАД, рассматриваются вопросы генерации низкочастотного аврорального километрового излучения (АКР) в пространственно ограниченном источнике. Особенностью орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2 является длительное движение вдоль магнитной оболочки ($L = \text{const}$) в авроральной области магнитосферы, что позволяет в этой области разделить пространственные и временные изменения параметров излучения.

Обнаруженное в эксперименте увеличение интенсивности АКР вблизи локальной гирочастоты электронов, интерпретируется нами как наблюдение медленных, волноводных мод внутри источника. «Классическое» АКР, представляющее собой X-моду электромагнитного излучения, является результатом трансформации волноводных мод на границе источника. Из сравнительного анализа измерений электромагнитного поля и параметров плазмы делается заключение, что на полярной границе авроральной области, во время геомагнитных возмущений образуется область с пониженной плотностью фоновой плазмы. В этой области развивается циклотронная мазерная неустойчивость, результатом чего является наблюдаемое излучение. Особенности изменения максимума спектра излучения позволяют оценить характерные поперечные размеры источника и относительную скорость движения спутника и источника.

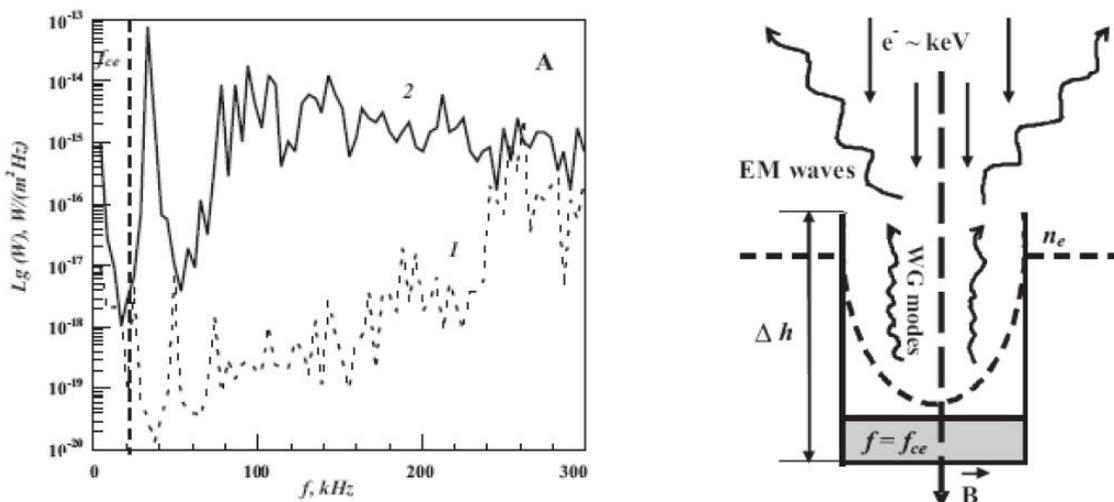


Рис. Справа: Спектры мощности АКР за 27.01.97: 1- спектр «классического» АКР, 2 - спектр низкочастотного АКР. Вертикальная пунктирная линия – значение локальной (вблизи спутника) циклотронной частоты электронов. Слева: Схема пространственно ограниченного источника АКР: заполненная область ($f=f_{ce}$)-область развития циклотронной мазерной неустойчивости, WG modes-регистрируемые волноводные моды внутри источника, EM waves- X-мода электромагнитного излучения.

Moiseenko, M. Mogilevsky, D. Chuginin, T. Romantsova, J. Hanasz, Waveguide modes in the AKR source, монография "Излучение планет – PRE VII", стр. 253-259, 2011

М.М. Могилевский, И.Л. Моисеенко, Т.В. Романцова, Я. Ханаш, Т.М. Буринская, Д.В. Чугунин, Прямые измерения аврорального километрового радиоизлучения в ограниченном источнике, Письма в ЖЭТФ, том 93, вып. 6, стр. 359-362, 2011.

Отв.: М.М. Могилевский, к.ф.-м.н., т. 333-14-33, mogilevsky@romance.iki.rssi.ru
И.Л. Моисеенко, м.н.с., т. 333-14-33

3.5. Источники магнитного поля B_y в хвосте магнитосферы Земли (ИКИ)

По итогам анализа 11 лет наблюдений спутником Geotail проанализированы источники и характеристики B_y компонента магнитного поля в плазменном слое хвоста. Построена эмпирическая модель B_y в зависимости от ММП, координат X , Y , и угла наклона геодиполя (сезона). Зависимость B_y от сезона проявляющаяся в связи с изгибанием и задирианием нейтрального слоя (warping, hinging) имеет нечетный профиль в зависимости от Y . В дополнение к ней, был обнаружен новый компонент B_y , четный по отношению к Y , который положительно коррелирует с углом наклона диполя и имеет максимальную амплитуду $\pm 1-2$ нТл. В послеполуночном секторе хвоста эти сезонные факторы взаимно компенсируются, а в предполуночном – складываются, составляя в сумме величину, сравнимую с основным фактором (проникновением ММП). Такая сезонная зависимость B_y создает принципиальную азимутальную несимметрию хвоста магнитосферы, что находится в согласии с данными по ионосферной конвекции и полярным сияниям. Часто наблюдается величина B_y значительно большая, чем предсказывается статистической моделью. Этот эффект может быть интерпретирован как «усиление» в ходе внутренней динамики плазменного слоя.

A.A. Petrukovich, Origins of plasma sheet B_y , Journal of Geophysical Research, vol. 116, A07217, doi:10.1029/2010JA016386, 2011.

Отв.: Петрукович А.А., д.ф.-м.н., зав. отд., 333-3267 (apetruko@iki.rssi.ru)

3.6. Экспериментальное изучение процессов ускорения плазмы в хвосте магнитосферы Земли (ИКИ)

а) Экспериментально установлено, что в те периоды, когда ускорение ионов в Токовом Слое (ТС) хвоста происходит в областях замкнутых силовых линий магнитного поля, распространение ускоренных ионов в Пограничном Плазменном Слое (ППС) не сопровождается протеканием заметных продольных электрических токов. Статистически установлено, что характерные плотности продольных электрических токов, текущих в ППС в такие периоды, не превышают 2 нА/м², что существенно меньше характерных плотностей продольных токов, создаваемых ускоренными ионами, движущимися вдоль силовых линий магнитного поля ППС. Это связано с тем, что в тех областях ТС, где силовые линии магнитного поля еще замкнуты, однако напряженность поля достаточно мала, чтобы размагнитить ионы, электроны все еще замагничены, и их эффективного ускорения не происходит. Направленная скорость электронов в ППС существенно меньше тепловой и сравнима по величине и направлению со скоростью ионов. Медленное ускорение электронов, захваченных внутри Плазменного Слоя (ПС), в такие интервалы, происходит за счет бетатронного механизма при их конвекции к Земле в области с более сильным магнитным полем. Таким образом, несмотря на наблюдаемую коллимацию высокоскоростных ионов в ППС по энергиям и пич-углам, их нельзя считать пучками, а следует рассматривать как часть высокоскоростного потока плазмы (Grigorenko et al., 2011a) (Рис.1)

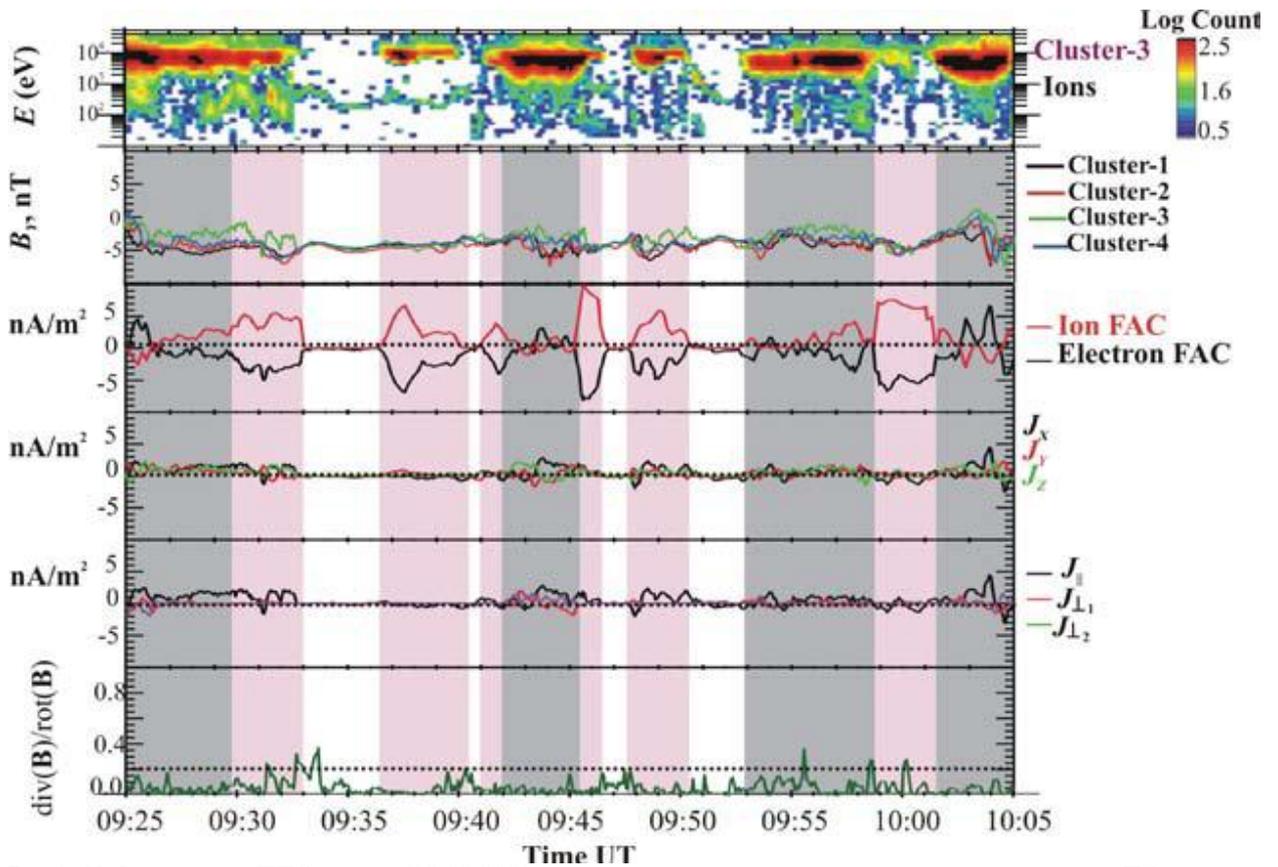


Рис.1. Наблюдение в ППС хвоста (12.09.2001) квазистационарного потока ионов, ускоренных в ТС хвоста в области замкнутых силовых линий магнитного поля. *Сверху вниз*: спектрограмма ионов (HIA, Cluster-3), ВУ с четырех спутников Cluster; продольный электрический ток, создаваемый ионами $J_{\parallel\text{ион}} = eNV_{\parallel}$ (показан красным) и электронами $J_{\parallel\text{эле}} = (\nabla \times \mathbf{B})_{\parallel} - J_{\parallel\text{ион}}$ (показан черным); три GSE-компоненты плотности полного электрического тока: $(\nabla \times \mathbf{B})_{\parallel}$; продольная и поперечные компоненты $(\nabla \times \mathbf{B})_{\perp}$; временной ход величины $(\nabla \mathbf{B})_{\parallel} / (\nabla \times \mathbf{B})_{\perp}$. Розовым цветом показаны интервалы пересечения высокоширотной границы ППС, серым цветом – интервалы, когда Cluster находился внутри ППС.

б) Также установлено, что в такие периоды вблизи высокоширотной границы полярного овала не наблюдается интенсификаций аврорального свечения, а на магнитограммах, измеренных наземными станциями расположенными вблизи проекции Cluster, – заметных вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля (Рис.2). Структуры ускоренных ионов, высыпаясь из ППС в высокоширотной авроральной области, участвуют в формировании квазистационарных пространственных энерго-диспергированных ионных структур (т.н. VDIS в англоязычной литературе) (Grigorenko et al., 2011b).

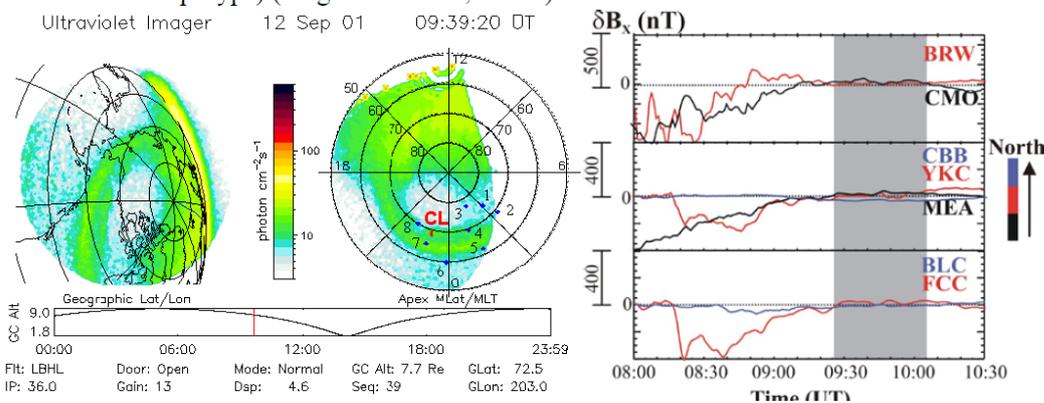


Рис.2. Слева: Наблюдение аврорального УФ свечения спутником Polar в период наблюдения в ППС хвоста квазистационарного потока ускоренных ионов. Красной точкой отмечено положение проекции Cluster на ионосферу. Синими точками отмечены наземные станции вблизи проекции Cluster, измерения которых (горизонтальная компонента магнитного поля) представлены в правой

части рисунка. Интервал наблюдения ускоренных ионов в ППС отмечен на магнитограммах серым цветом.

в) Когда ускорение ионов происходит вблизи магнитной X-линии (что, как правило, имеет место во время возмущенных геомагнитных периодов) в ППС наблюдается система противоположно направленных продольных токов, формируемых в результате пространственного разделения зарядов вблизи области магнитного пересоединения (Рис.3). Эта система токов поддерживается в основном за счет электронов: ток, текущий вблизи 38 высокоширотной границы ППС к Земле, создается, в основном, потоком еще не ускоренных электронов, движущихся в направлении области пересоединения (что соответствует направлению от Земли на тех расстояниях, где производились измерения). Продольный ток, текущий в ППС от Земли создается потоком ускоренных электронов, движущихся к Земле из области пересоединения. Характерные плотности высокоширотного продольного тока не превышали 5 нА/м², в то время как характерные плотности низкоширотного тока варьировали от случая к случаю в пределах от 5 до 16 нА/м² и в каждом случае величина их плотности превышала плотность соответствующего высокоширотного тока. Благодаря многоточечным наблюдениям Cluster, для 11 событий удалось оценить пространственный размер (вдоль нормали к поверхности ППС) продольного тока, текущего вдоль высокоширотной границы ППС, который оказался порядка инерционной длины ионов. Этот факт подтверждает механизм формирования данной системы токов за счет холловского разделения зарядов вблизи магнитной X-линии. Длительности наблюдения в ППС холловской системы продольных токов в большинстве случаев были порядка длительности наблюдения в ППС ускоренных ионов, что указывает на общий источник их генерации – магнитное пересоединение в ТС ближнего хвоста. (Grigorenko et al., 2011a).

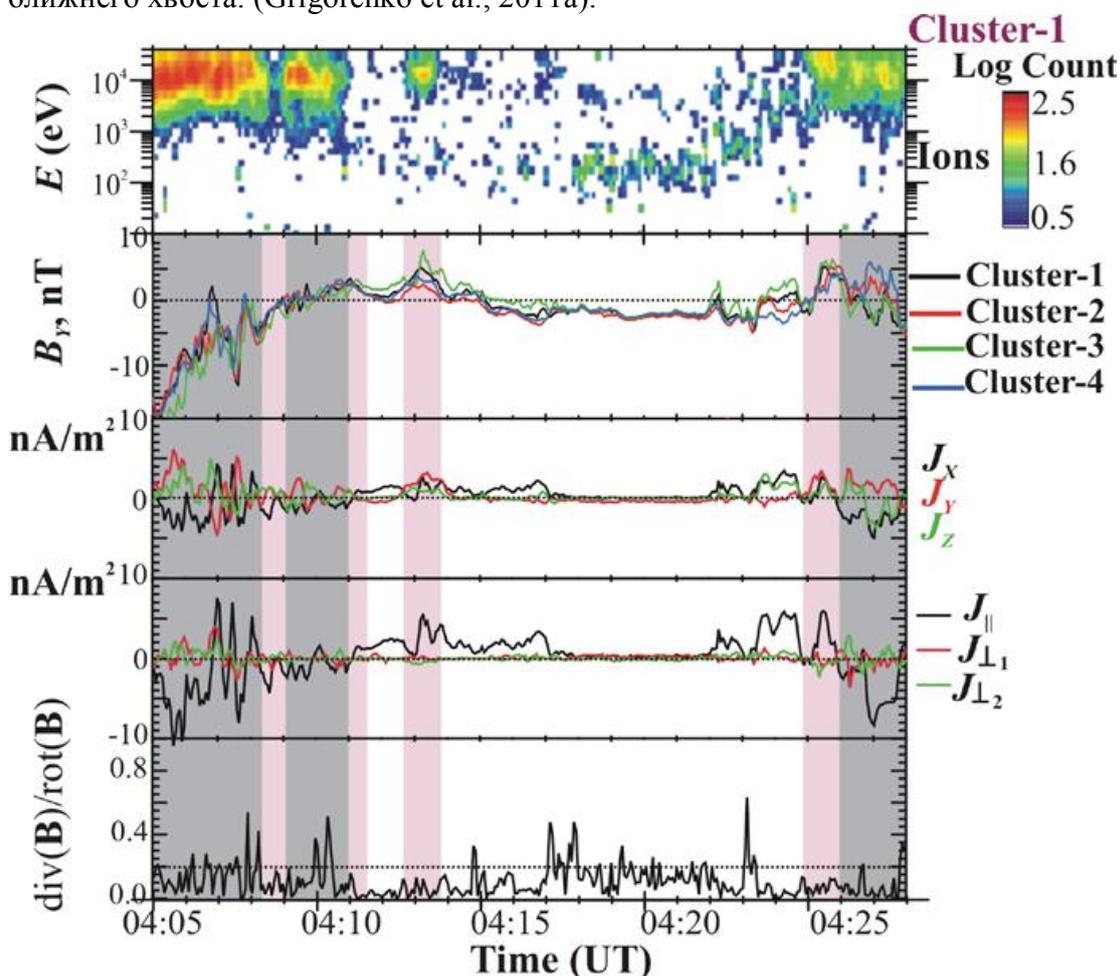


Рис.3. Наблюдение в ППС хвоста пучков ионов, ускоренных вблизи магнитного пересоединения 27.08.2001. Формат рисунка такой же, как Рис.1.

г) Установлено, что в такие периоды магнитные силовые трубки ППС, вдоль которых распространяются ускоренные пучки, проецируются в области интенсификации авроральных свечений. На магнитограммах наземных станций, находящихся вблизи проекции Cluster, наблюдались заметные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля (Рис.4). Энергичные ионные пучки, ускоряемые в хвосте вблизи магнитной X-линии, высыпаясь в высокоширотной авроральной области, участвуют в формировании короткоживущих энерго-диспергированных ионных структур (т.н. TDIS) (Grigorenko et al., 2011b).

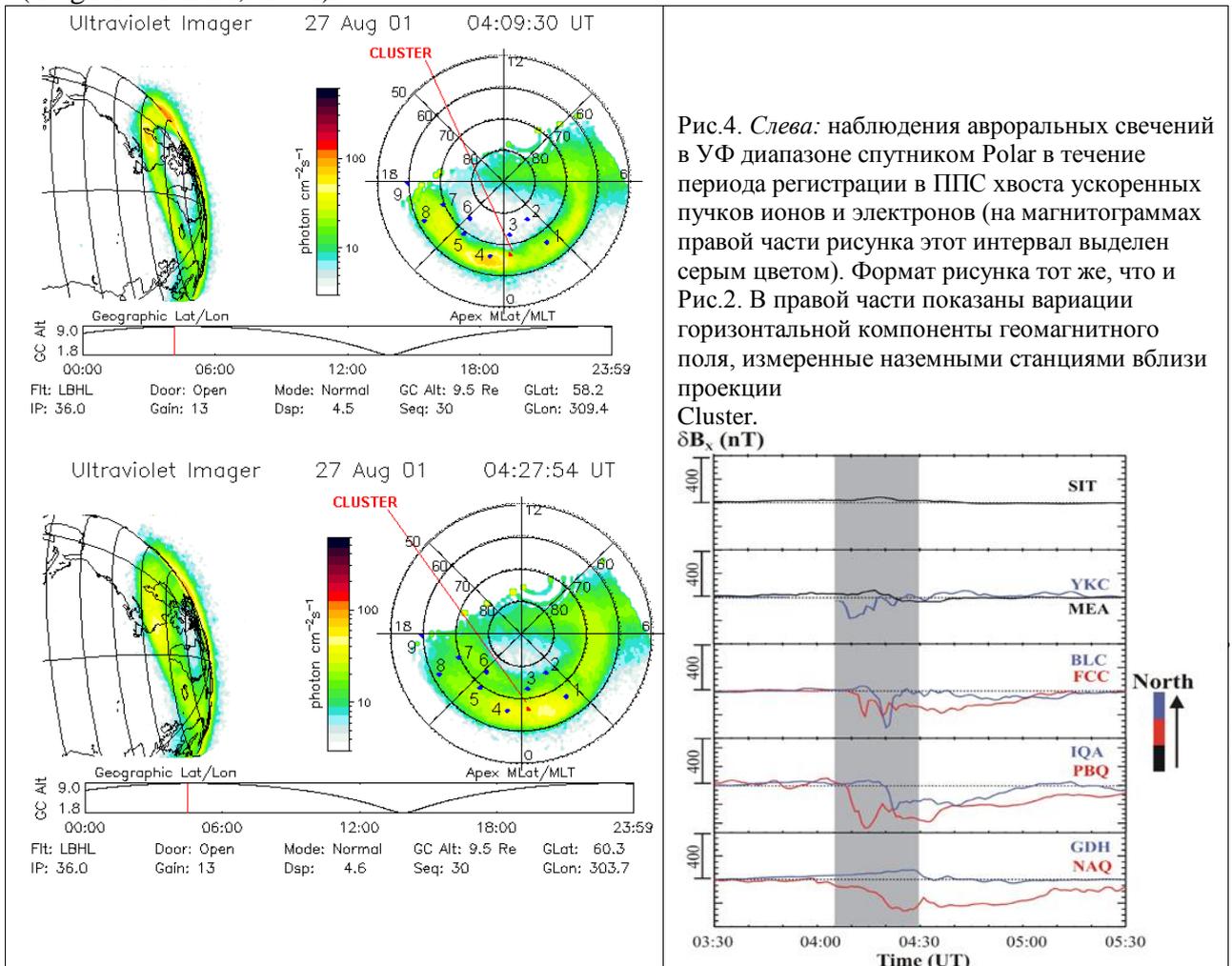
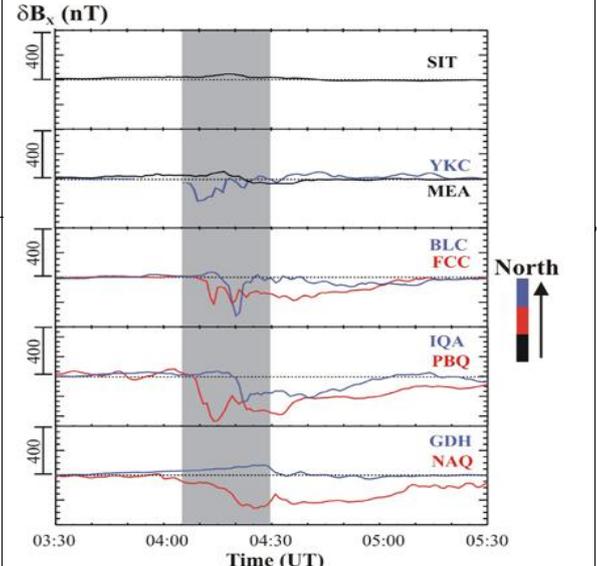


Рис.4. Слева: наблюдения авроральных свечений в УФ диапазоне спутником Polar в течение периода регистрации в ППС хвоста ускоренных пучков ионов и электронов (на магнитограммах правой части рисунка этот интервал выделен серым цветом). Формат рисунка тот же, что и Рис.2. В правой части показаны вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля, измеренные наземными станциями вблизи проекции Cluster.



E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi, M.S. Dolgonosov, A.V. Artemiev, C. J. Owen, J.-A. Sauvaud, M. Hoshino, M. Hirai, Non-adiabatic ion acceleration in the Earth magnetotail and its various manifestations in the Plasma Sheet Boundary Layer, Space Sci. Rev., accepted for publication in November 2011a.

Отв.: Григоренко Е. Е., д.ф.-м.н., т. 333-14-67, elenagrigenko2003@yahoo.com, grig@romance.iki.rssi.ru

3.7. Исследование турбулентных флуктуаций в геомагнитном хвосте по данным спутников проектов THEMIS и CLUSTER (НИИЯФ МГУ + ИКИ)

В середине 90-х годов в работах Антоновой и Овчинникова была разработана теория квазиравновесного плазменного слоя, в которой толщина слоя в условиях магнитостатического равновесия определялась из условия равенства регулярного и квазидиффузионного потоков поперек слоя. В данной теории плазменный слой

рассматривался в качестве турбулентного следа, который турбулентный солнечный ветер образует за обтекаемым препятствием – магнитным полем Земли. Теория предсказывала величину коэффициента квазидиффузии в плазменном слое. Анализ результатов наблюдений на спутниках ISEE-2, Интербол/Хвостовой зонд и Geotail подтвердил предсказания теории. Глобальный анализ уровня флуктуаций первоначально на спутнике Интербол/Хвостовой зонд, а затем на всех спутниках проекта THEMIS (опубликованный в этом году в работе [Stepanova et al., 2011]), показал, что уровень флуктуаций и соответственно коэффициент квазидиффузии зависит от фазы магнитосферной суббури и геоцентрического расстояния, резко уменьшаясь на геоцентрических расстояниях менее $10R_E$. Данную статистическую картину удалось проверить в магнитоспокойных условиях, сопоставляя одновременные измерения вытянувшихся в одну цепочку спутников проекта THEMIS [Pinto et al., 2011]. Для дальнейшей проверки предсказаний теории требовались одновременные измерения коэффициента квазидиффузии поперек плазменного слоя, толщины слоя и крупномасштабного поля утро-вечер. Такая проверка была проведена для события 12 сентября 2004 г. в работе [Stepanova and Antonova, 2011], когда спутники проекта CLUSTER пересекали плазменный слой и имелись одновременные данные измерений радара SuperDARN, позволяющие оценить величину поля утро-вечер. Результаты анализа показали, что экспериментально определенная толщина турбулентного плазменного слоя хорошо соответствует теоретическим предсказаниям.

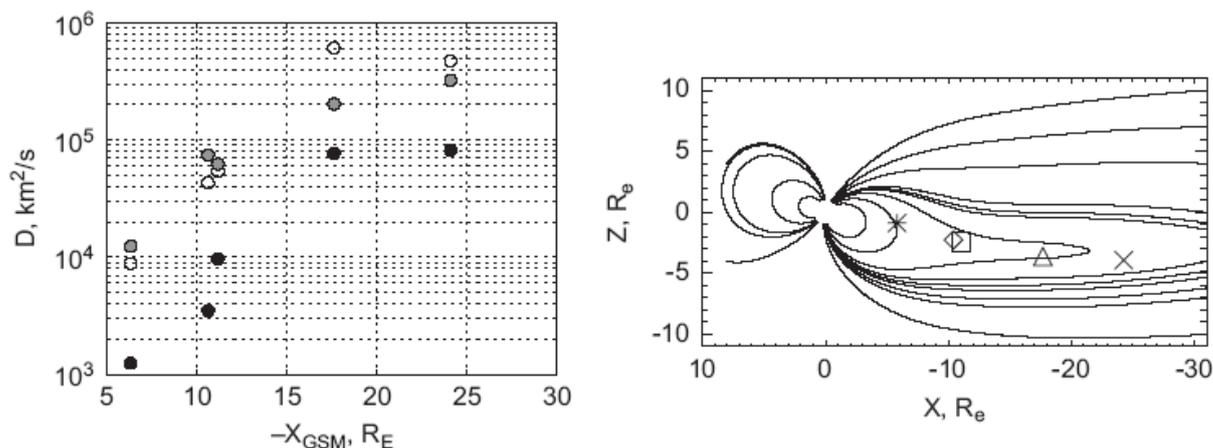


Рис. Зависимость одновременно измеренных диагональных элементов тензора вихревой диффузии от геоцентрического расстояния, полученная в ходе анализа наблюдений в проекте THEMIS с 05:00 до 06:00 UT 22 февраля 2008 (левая часть рисунка). Светлые кружки – D_{xx} , серые кружки – D_{yy} , темные кружки – D_{zz} [Pinto et al., 2011]. Справа показано положение спутников во время наблюдений.

Stepanova, M., V. Pinto, J. A. Valdivia, and E. E. Antonova, Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data, *J. Geophys. Res.*, 116, A00I24, 2011.

Stepanova M., E.E. Antonova, Modeling of the turbulent plasma sheet during quiet geomagnetic conditions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 1636–1642, 2011.

Pinto V., M. Stepanova, E.E. Antonova, J.A. Valdivia, Estimation of the eddy-diffusion coefficients in the plasma sheet using THEMIS satellite data, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 1472–1477, 2011.

Отв.: Антонова Е. Е., проф., д.ф.-м.н., т. 333-13-88, antonova@orearm.msk.ru

3.8. Изучение характеристик окружающего Землю плазменного кольца и его роли в суббуревой и буревой динамике (НИИЯФ МГУ + ИКИ)

Создана база данных измерений давления плазмы более чем за 3 года работы спутников проекта THEMIS, за период с августа 2007 по сентябрь 2010 г. Анализировались моменты

функций распределения ионов и электронов, восстанавливаемые двумя различными приборами: ESA - электростатический анализатор ионов в диапазоне энергий от 1.6 эВ до 25 кэВ и электронов от 2 эВ до 32 кэВ, SST - твердотельный телескоп, регистрирующий ионы в диапазоне энергий от 25 кэВ до 6 МэВ и электроны от 25 кэВ до ~900 кэВ. Произведено статистическое исследование распределения плазменного давления в экваториальной плоскости при $15RE > XSM > -15RE$ и $15RE > YSM > -15RE$. Проведен анализ радиальной зависимости давления плазмы на меридианах день-ночь и утро-вечер. Показано, что окружающее Землю кольцо плазмы имеет структуру близкую к азимутально симметричной. Показано, что в пределах ошибок определения давления, в перекрывающихся областях полученные результаты согласуются с результатами, полученными ранее. Проведен анализ, демонстрирующий локализацию начала взрывной фазы изолированной суббури внутри окружающего Землю плазменного кольца, в котором сосредоточены основные источники крупномасштабных продольных токов. Продолжены работы, демонстрирующие доминирующий вклад токов в окружающем Землю плазменном кольце (топологически – кольцевого тока и его высокоширотного продолжения) в создании Dst вариации во время магнитных бурь средней интенсивности.

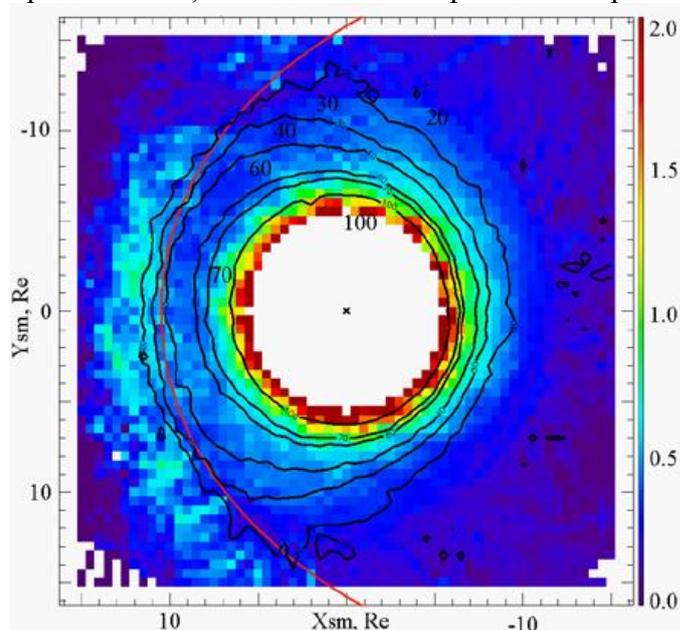


Рис. Распределение давления p_{\perp} , нПа, шкала приведена справа.

Elizaveta E. Antonova, Igor P. Kirpichev, Ilya L. Ovchinnikov, Maria S. Pulinets, Svetlana S. Znatkova, Ksenia G. Orlova, and Marina V. Stepanova, Topology of High-Latitude Magnetospheric Currents, IAGA Special Sopron Book Series, Volume 3, The Dynamic Magnetosphere, Editors William Liu and Masaki Fujimoto, Springer, 2001-2010, 2011.

Кирпичев И.П., Антонова Е.Е., Распределение давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы Земли на геоцентрических расстояниях от 6 до 10RE по данным международного проекта THEMIS, Геомагнетизм и аэрономия, т. 51, № 4, p. 456-461, 2011.

Вовченко В. В., Е. Е. Антонова, Зависимость объемов магнитных силовых трубок от давления плазмы в осесимметричном магнитном поле и Dst вариация, Геомагнетизм и аэрономия, т. 52, № 1, 2012 г., принято к печати.

Отв.: Кирпичев И. П., к.ф.-м.н., т. 333-1467, ikir@iki.rssi.ru

Антонова Е. Е., проф., д.ф.-м.н., т. 333-13-88, antonova@orearm.msk.ru

Вовченко В. В., м.н.с. отд.54, т. 333-11-22, a1246@rambler.ru

3.9. Исследование локализации областей ускорения энергичных электронов (НИИЯФ МГУ + ИКИ)

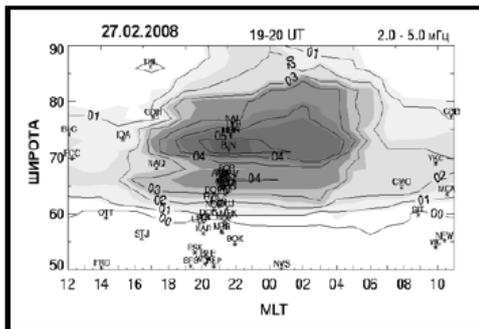
Анализ результатов наблюдений на низкоорбитальном спутнике КОРОНАС-Ф продемонстрировал возникновение возрастаний потоков энергичных электронов (с энергией более 300 кэВ) к полюсу от внешней границы внешнего радиационного пояса в области квазизахвата. Некоторые возрастания имели квазистационарный характер, т.е. повторялись на 2-4 орбитах с почти неизменной амплитудой и формой. Было установлено, что исследуемые возрастания наблюдаются на широтах аврорального овала, но не имеют азимутальной симметрии. Возникла гипотеза о возможности формирования локальных ловушек для энергичных частиц, в которых дрейфовые траектории энергичных частиц не окружают Землю. Возможность образования таких ловушек была продемонстрирована при определении изолиний минимальных значений магнитного поля на магнитной силовой линии с использованием моделей Цыганенко-1996, 2001, 2005. Начаты работы по моделированию процессов образования локальных ловушек при конвекции плазмы.

Antonova E.E., I.M. Myagkova, M.V. Stepanova, M.O. Riazantseva, I.L. Ovchinnikov, B.V. Mar'in, M.V. Karavaev, Local particle traps in the high latitude magnetosphere and the acceleration of relativistic electrons, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (2011) 1465–1471.

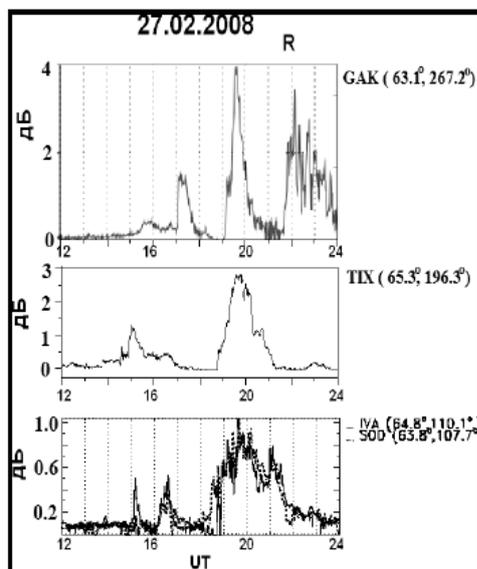
Отв.: Е.Е. Антонова, проф., д.ф.-м.н., т. 333-13-88, antonova@orearm.msk.ru
М.О. Рязанцева, к.ф.м.н., т. 333-13-88, orearm@hotbox.ru

3.10. ОНЧ-хоры, Pc5 геомагнитные пульсации и риометрическое поглощение в начальную фазу магнитной бури (ИФЗ + ИКИ)

Выполнен анализ комплекса геофизических явлений (геомагнитные пульсации, ОНЧ излучения, риометрическое поглощение и полярные сияния) в начальную фазу рекуррентной магнитной бури 27 февраля – 2 марта 2008 г. в минимуме солнечной активности. Начальная фаза этой бури развивалась на фоне длительного периода отрицательных значений V_z ММП, вероятно, поэтому интенсивные волновые возмущения наблюдались не в дневном, что типично для большинства бурь, а в вечернем и ночном секторах. Обнаружено одновременное появление ОНЧ хоров, сопровождаемых всплесками риометрического поглощения и Pc5 пульсациями, в необычно большом долготном интервале авроральных широт ($L \sim 5$) – от предполуночных до утренних часов MLT. Сделан вывод, что в начальную фазу магнитной бури резкое возрастание динамического давления солнечного ветра на переднем фронте высокоскоростного потока солнечного ветра на фоне длительных отрицательных значений V_z ММП привело к глобальному по долготе развитию электронно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере Земли.



Карта пространственного распределения амплитуд геомагнитных пульсаций ($f=2-5$ МГц)



Одновременные всплески риометрического поглощения в 20 UT (09 MLT-GAK, 04 MLT-TIX, 23 MLT-SOD)

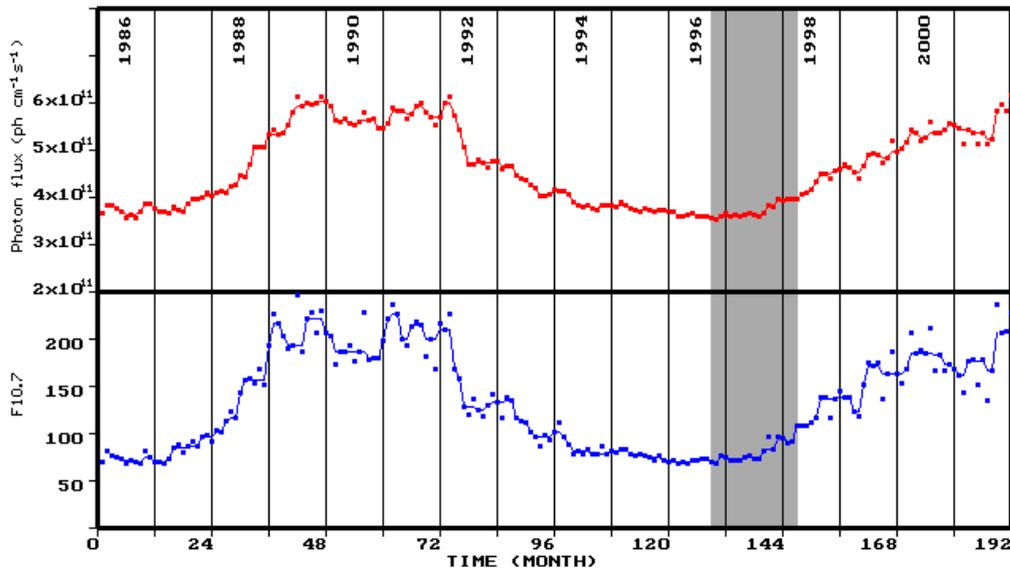
Клейменова Н.Г., Козырева О.В, Маннинен Ю., Райта Т., Корнилова Т.А., Корнилов И.А., Высокоширотные геомагнитные возмущения в начальную фазу рекуррентной магнитной бури (27 февраля–2 марта 2008 г.), Геомагнетизм и Аэрономия, т. 51, № 6, 746-756. 2011.

Отв.: Клейменова Н. Г., д.ф.-м.н., проф., 254-42-90, kleimen@ifz.ru

3.11. Фотоэмиссионные свойства магнитосферных спутников при низкой солнечной активности на примере спутника Интербол-2 (ИКИ)

Изучение фотоэмиссии спутника Интербол-2 основывается на сопоставлении одновременных измерений потенциала спутника зондовыми приборами ИЭСП-2 (измеритель электрических полей) и КМ-7 (датчик электронной температуры). Плотность фототока со спутника Интербол-2 в Авроральной зоне магнитосферы составляла, как правило, $1.8 \div 3.6$ нА см⁻², что характерно для ионосферных спутников. Но фототок быстро возрастал со временем функционирования аппарата в космосе. В феврале-марте 1998 года плотность фототока тока со спутника Интербол-2 достигла $3.6 \div 4.0$ нА см⁻². Такие величины регистрируются на ионосферных спутниках только в максимуме солнечной активности.

На рисунке показан график среднемесячных изменений параметров F10.7 и $L\alpha$ (1215 Å) в цикле солнечной активности. Период изучения фотоэмиссии со спутника Интербол-2 показан на рисунке затемненной областью. Быстрый рост фотоэмиссии с этого спутника при небольшом росте потока $L\alpha$, по-видимому, связан с модификацией фотоэлектрических свойств поверхности спутника за время проведения измерений.



Смирнова Н.Ф., Мулярчик Т.М., Станев Г., Терехов С.А., Особенности заряжения космических аппаратов в магнитосферной плазме в период низкой солнечной активности на примере спутника Интербол-2. //сборник тезисов конференции "Физика плазмы в солнечной системе", 14-18 февраля 2011 г., ИКИ РАН, с. 109-110.

Отв.: Смирнова Н.Ф., н.с., nsmirnova@romance.iki.rssi.ru

3.12. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами (ИПФ)

3.12.1. Исследованы два механизма формирования понижающихся тонов в динамическом спектре хорových КНЧ-ОНЧ излучений в магнитосфере Земли. Найдено, что генерация понижающихся тонов имеет место в случае, когда область генерации смещается от экваториальной плоскости (минимума геомагнитного поля) в сторону, противоположную движению энергичных электронов. В качестве двух механизмов смещения области генерации от экватора рассмотрены (1) увеличение линейного инкремента неустойчивости (например, за счет роста концентрации энергичных частиц) и (2) сохранение фазовой группировки частиц, возвращающихся в область генерации за счет баунс-осцилляций. Показано, что оба эти механизма могут привести к формированию понижающихся тонов, причем свойства генерируемых излучений (скорость дрейфа частоты, характерный интервал следования элементов) оказываются различными, и параметры наблюдаемых хорových излучений больше соответствуют второму механизму.

Одним из наиболее ярких видов дискретных электромагнитных излучений в околоземном космическом пространстве являются т.н. хорových излучения в ОНЧ диапазоне (1-10 кГц), генерируемые в свистовой моде вследствие циклотронной неустойчивости энергичных электронов и представляющие собой квазимонохроматические волновые пакеты с быстро изменяющейся частотой. Известно, что эти сигналы генерируются в малой окрестности вершины геомагнитной силовой линии (длина области генерации вдоль магнитного поля 2-5 тыс. км). Малая длина области генерации, большой инкремент и быстрый дрейф частоты хорových излучений могут быть объяснены в рамках предложенной В. Ю. Трахтенгерцем в 1995 г. модели, основанной на переходе плазменного магнитосферного циклотронного мазера в режим лампы обратной волны (ЛОВ). Этот режим, представляющий собой абсолютную неустойчивость свистовых волн, может реализоваться при наличии достаточно резкого перепада (ступеньки) на функции распределения энергичных электронов по продольным скоростям, когда волна пространственного заряда является слабозатухающей. В свою очередь, подобная деформация функции распределения образуется при циклотронном взаимодействии

электронов в неоднородном магнитном поле с шумовыми излучениями, частотный спектр которых имеет достаточно резкую верхнюю границу, и такая ситуация возникает в магнитосфере естественным путем в процессе циклотронной генерации шумовых ОНЧ излучений. В работе (Демехов, Трахтенгерц, 2005) получена упрощенная система нелинейных уравнений, описывающих динамику магнитосферной ЛОВ в предположении малого КПД взаимодействия волн и частиц. В работе (Демехов, Трахтенгерц, 2008) проанализировано влияние неоднородности магнитного поля на нелинейную динамику абсолютной неустойчивости свистовых волн в магнитоактивной плазме (режим лампы обратной волны - ЛОВ) при наличии ступенчатой деформации на функции распределения энергичных электронов по скоростям. Показано, что неоднородность оказывает принципиальное влияние на динамику спектра возбуждаемых волн в случае, когда длина системы много больше размера, определяющего линейную стадию режима ЛОВ. При развитии неустойчивости вблизи центрального сечения магнитной ловушки (именно такая ситуация типична для свистовых волн в магнитосфере Земли), с увеличением превышения порога генерации происходит не только переход от стационарной генерации к периодической и далее к стохастической генерации, что характерно и для случая однородной среды, но и разбиение генерируемого излучения на отдельные волновые пакеты (дискретные элементы) с повышающейся частотой. Параметры этих элементов (характерный интервал их следования и скорость дрейфа частоты), найденные в результате моделирования, неплохо соответствуют параметрам хороших ОНЧ излучений, наблюдаемых в магнитосфере Земли. Таким образом, предложенная ранее модель формирования хороших излучений, основанная на переходе магнитосферного циклотронного мазера в режим ЛОВ, получила подтверждение на основе самосогласованной нелинейной теории. В работе (Демехов, 2010) исследованы механизмы формирования понижающихся тонов в динамическом спектре хороших ОНЧ излучений в магнитосфере. Продемонстрировано, что генерация понижающихся тонов имеет место в случае, когда область генерации смещается от экваториальной плоскости (минимума геомагнитного поля) в сторону, противоположную движению энергичных электронов. При этом резонансные электроны в процессе генерации движутся в сторону уменьшения геомагнитного поля, поэтому их продольная скорость увеличивается, что соответствует уменьшению частоты циклотронного резонанса. В качестве двух механизмов смещения области генерации от экватора рассматриваются (1) увеличение линейного инкремента неустойчивости (например, за счет роста концентрации энергичных частиц) и (2) сохранение фазовой группировки частиц, возвращающихся в область генерации за счет баунс-осцилляций. Показано, что оба эти механизма могут привести к формированию понижающихся тонов (см. рис. 3), причем свойства генерируемых излучений (скорость дрейфа частоты, характерный интервал следования элементов) оказываются различными, и параметры наблюдаемых хороших излучений больше соответствуют второму механизму. Обсуждаются условия сохранения фазовой группировки частиц при баунс-осцилляциях. По-видимому, данный механизм может действовать в случае, когда размер области генерации вдоль магнитного поля близок к характерной длине баунс-осцилляций резонансных электронов, что реализуется при достаточно высокой плотности холодной плазмы в области генерации. Согласно расчетам, элементы с понижающейся частотой формируются на краю области генерации; это согласуется с наблюдениями на спутнике OGO 5, показывающими отсутствие таких событий в непосредственной близости от экватора.

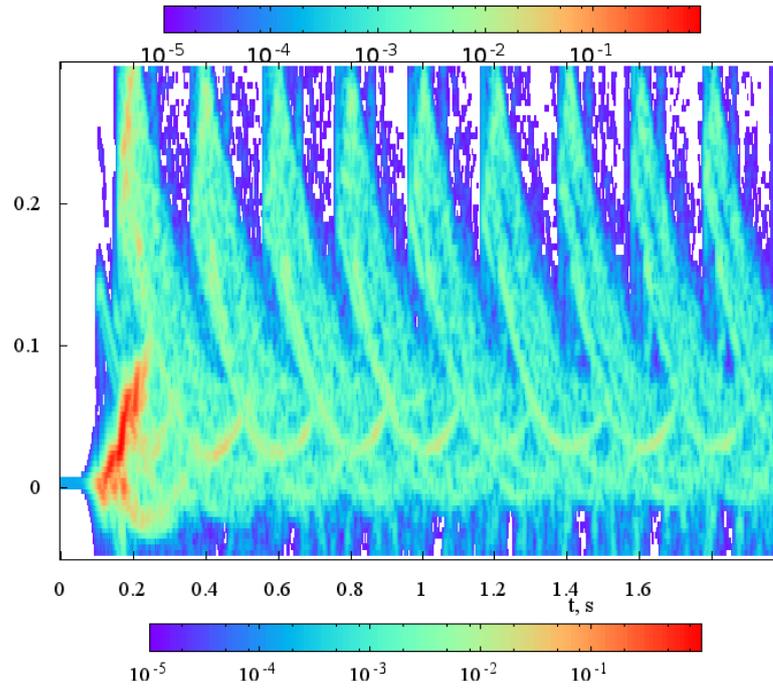
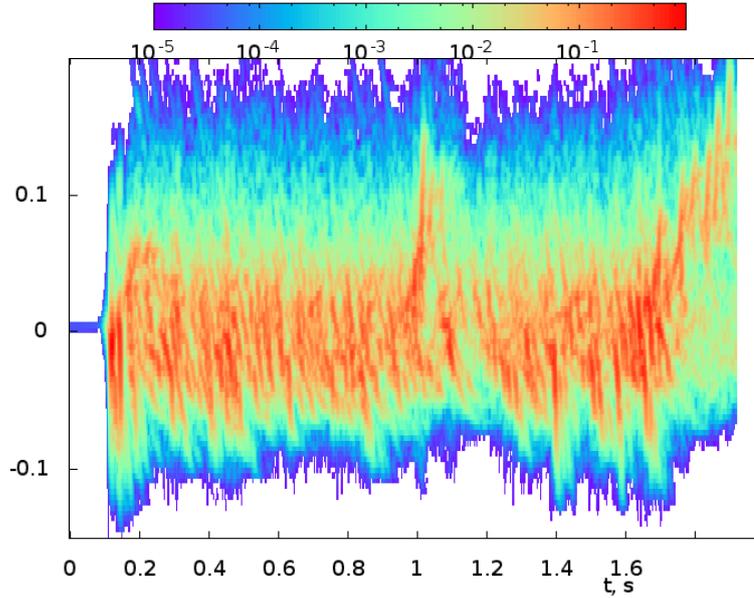
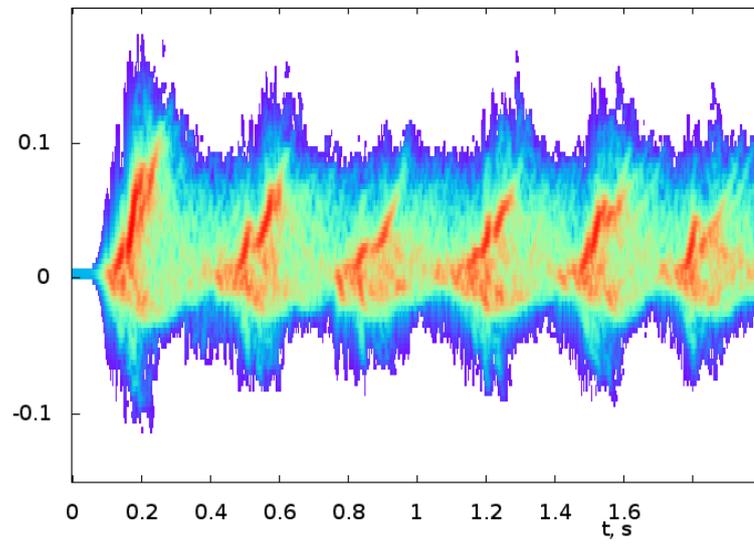


Рис. 3: Динамические спектры выходного сигнала в магнитосферной ЛОВ при разных значениях превышения потока энергичных электронов S над порогом генерации S_{thr} (вверху — $S/S_{thr} = 10$, в центре — $S/S_{thr} = 60$) и разных граничных условиях (внизу - «периодические» граничные условия для частиц: на вход области взаимодействия поступают частицы с фазовой группировкой, отвечающей вышедшим из этой области частицам.). По вертикальной оси отложен нормированный сдвиг частоты $\Delta\omega/\omega$, ω — гирочастота электронов. При этом понижающиеся тоны следуют с довольно малым характерным интервалом. Расчеты проведены для концентрации фоновой плазмы $N = 10 \text{ см}^{-3}$, $L=4,4$, для сопоставления с результатами наблюдений на спутниках Cluster

Демехов А.Г. О генерации ОНЧ излучений с повышающейся и понижающейся частотой в магнитосферном циклотронном лазере в режиме лампы обратной волны // Изв. вузов — Радиофизика. — 2010. — Т. 53, № 11. — С.679–694.

3.12.2. Исследована наблюдаемая в эксперименте зависимость скорости дрейфа частоты от плотности фоновой плазмы. Продемонстрировано увеличение скорости дрейфа частоты с уменьшением плотности плазмы. Эти результаты сопоставлены с численными расчетами триггерных излучений и с оценками, основанными на модели лампы обратной волны для хороших излучений. Продемонстрировано хорошее согласие экспериментальных результатов и теории.

Macusova E., Santolik O., Decreau P., Demekhov A.G., Nunn D., Gurnett D. A., Pickett J. S., Titova E. E., Kozelov V.V. Observations of the relationship between frequency sweep rates of chorus wave packets and plasma density // J. Geophys. Res. - 2010. - V. 115, No.A12. A12257, doi:10.1029/2010JA015468.

3.12.3. Проведен анализ и составлен обзор недавних достижений по исследованию резонансных явлений в УНЧ диапазоне (0,1÷10 Гц) в системе атмосфера-ионосфера-магнитосфера, сформулированы основные направления и актуальные задачи этих исследований. В частности, на основе теории возбуждения волн в ионосферном альфвеновском резонаторе проанализированы недавние попытки искусственного стимулирования генерации альфвеновских вихрей в ионосфере.

Demekhov A.G. Coupling at the atmosphere-ionosphere-magnetosphere interface and resonant phenomena in the ULF range // Space Sci. Rev. — 2011. — doi:10.1007/s11214-011-9832-6 (published online).

3.13 Динамика радиационных поясов Земли и Юпитера (ИПФ)

3.13.1. Предложен новый механизм формирования узкополосных излучений и квазипериодических последовательностей импульсов декаметрового радиоизлучения Юпитера, основанный на эффекте изменения амплитудно-частотных характеристик излучения при прохождении его через область с нестационарным возмущением параметров среды. Показано, что нестационарные возмущения магнитного поля могут играть ключевую роль в формировании указанных видов излучений в условиях распространения волн в области сильной дисперсии вблизи отсечки необыкновенной волны. Проведены численные эксперименты, демонстрирующие влияние нестационарности среды на динамические спектры излучения и, в частности, получены условия перехода узкополосных излучений в последовательности импульсов и обратно.

Shaposhnikov V.E., Korobkov S.V., Kostrov A.V., Rucker H.O., Litvinenko G.L. Parametric mechanism for formation of the Jovian millisecond radio bursts // J. Geophys. Res. 2011. V.116, No.A3. A03205, doi:10.1029/2010JA016041.

3.13.2. Количественно исследован вклад полей коротации в атмосферную токовую систему при опережающем вращении слоя ионосферной плазмы. Показано, что наличие слоя ионосферной плазмы с опережающим вращением всегда приводит к ослаблению электрических полей и токов, возникающих в нижней атмосфере вследствие эффекта планетарного электрического генератора.

Давыденко С.С. О влиянии ионосферных течений на поля и токи планетарного электрического генератора // Геомагнетизм и аэронавигация. 2012. Т.52, №1. С.1-11.

3.13.3. Разработана численная модель электромагнитного поля в окрестности изолированного молниевых разряда в плоской атмосфере. Модель основана на методе конечных разностей во временной области и описывает как медленное изменение электрического поля, связанное с максвелловской релаксацией возмущения пространственного заряда, так и соответствующий электромагнитный импульс, обусловленный быстрым изменением разрядного тока. Молниевый разряд рассматривается как кратковременный распределённый вертикальный сторонний ток, после окончания которого в атмосфере формируется зарядовый диполь (например, в случае внутриоблачного или высотного разряда) либо монополь (в случае разряда облако-Земля). Модельный временной профиль разрядного тока предполагает наличие возвратного удара, стадии продолжающегося тока и тонкой структуры типа М-компоненты. В рамках модели найдены зависимости атмосферного электрического поля от типа разряда, возмущения электрической проводимости внутри грозового облака, параметров разряда (высоты, относительного положения и размеров областей пространственного заряда, а также временного профиля разрядного тока) и расстояния до молниевых разряда. Выполнены оценки полного электрического заряда, перетекающего к верхним слоям атмосферы после молниевых разряда, и вклада транзитных источников в глобальную электрическую цепь. Показана возможность восстановления параметров разряда на основе данных одно- и многоточечных наземных наблюдений электрического поля.

Davydenko S.S., Mareev E.A., Sergeev A.S., Shlyugaev Yu.V. Modeling Atmospheric Electromagnetic Field Following a Lightning Discharge // Proceedings of XIV International Conference on Atmospheric Electricity, 07-12 August, 2011, Rio de Janeiro, Brazil, paper 229, 4 pp.

Davydenko S.S. An Effect of the Global Ionospheric Flow on the Electric Field in the Lower Atmosphere // Proceedings of XIV International Conference on Atmospheric Electricity, 07-12 August, 2011, Rio de Janeiro, Brazil, paper 231, 4 pp.

Anisimov S.V., Davydenko S.S., Mareev E.A. Modern Understanding of the Global Circuit Formation // Proceedings of XIV International Conference on Atmospheric Electricity, 07-12 August, 2011, Rio de Janeiro, Brazil, paper 226, 4 pp.

3.14. Генерация, распространение и взаимодействие электромагнитных излучений в магнитосферах планет, диагностика плазмы (ИПФ)

На основе теории плазменного магнитосферного мазера проанализированы условия возбуждения различных типов естественных электромагнитных излучений в электронных радиационных поясах Земли в зависимости от плазменных параметров, геометрии системы, процессов переноса волн, закономерностей накопления частиц и их высыпания из магнитной ловушки. На этой основе предложены новые методы диагностики величины и угловой зависимости мощности естественных источников энергичных электронов в магнитосфере Земли.

Беспалов П.А. Некоторые новые возможности диагностики магнитосферы по характеристикам свистовых излучений // Геомагнетизм и аэронавигация, 2011. Т. 51, № 2. С. 229–236.

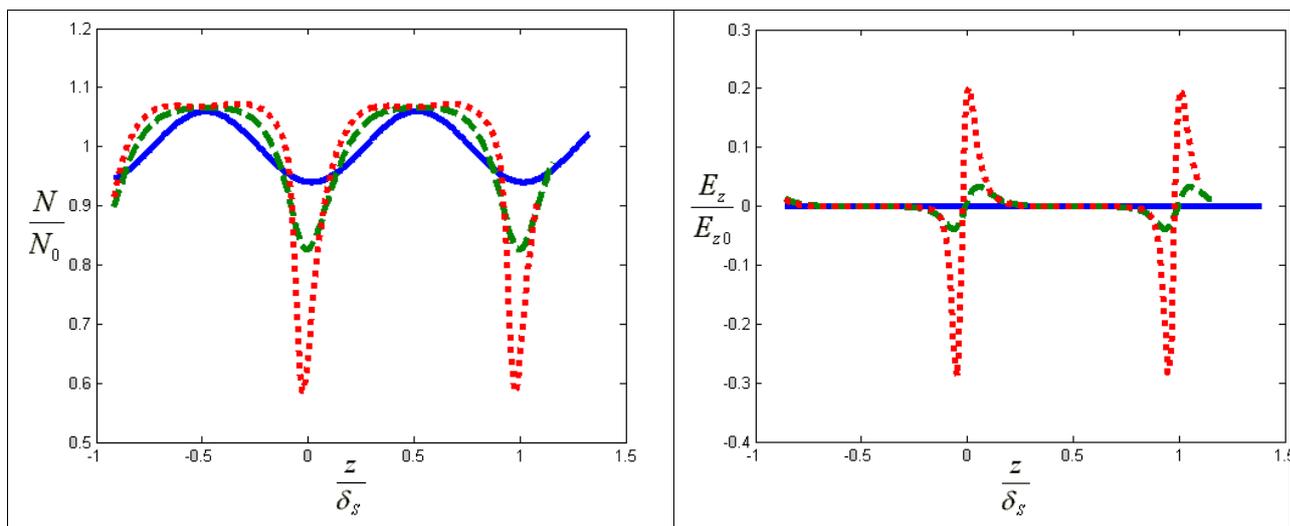


Рис. 4. Координатные зависимости безразмерных значений концентрации частиц и электрического поля в разные моменты времени

3.14.2. Для разреженной плазмы авроральной магнитосферы изучено формирование каверн плотности в поле кинетической альвеновской волны, распространяющейся почти поперек внешнего магнитного поля. Рассмотрены процессы вытеснения плазмы из областей с пониженной плотностью и образование каверн плотности с квадрупольными электрическими полями. Проведены аналитические и численные расчеты, демонстрирующие процесс формирования каверны плотности (рис. 5). Оценены основные параметры турбулентности: характерное время образования каверн, минимальная концентрация плазмы и электрическое поле в каверне, эффективная частота соударений электронов с полем каверн и обусловленная этими соударениями аномальная проводимость плазмы на начальной стадии их формирования. Полученные результаты важны для понимания физики турбулентной плазмы в зоне авроральных продольных токов и закономерностей формирования потоков надтепловых электронов и протонов.

Беспалов П.А., Мизонова В.Г. Формирование каверн плотности с нестационарным электрическим полем в зоне авроральных продольных токов // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 4. С. 489-497.

Savina O.N., Bepalov P.A. Ion-acoustic instability and anomalous thermal conductivity in the transition region // Central European Astrophysical Bulletin (CEAB), 2011. V. 34, No.1 P. 83-91.

3.14.3. Рассмотрено влияние на уровень возмущенности горизонтальной компоненты наземного геомагнитного поля дневного и вечернего выступов плазмосферы на стадии распада кольцевого тока. Показано, что горизонтальная компонента геомагнитного поля меняется своеобразно и синхронно в области, отвечающей дневному выступу плазмосферы. Вне выступа, временной ход горизонтальной компоненты геомагнитного поля заметно отличается. Спектральный анализ возмущений горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне геомагнитных пульсаций показал, что на магнитных станциях расположенных на силовых линиях соответствующих дневному и вечернему выступам плазмосферы, наблюдается повышение интенсивности в диапазоне пульсаций $Pc-4$. Обнаруженные пульсации, вероятно, отражают резонансные колебания магнитных силовых линий в области продольных токов на сравнительно малых высотах. По нашему мнению, это обусловлено неустойчивостью продольных токов, возникающих вследствие взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с электромагнитными волнами в области относительно плотной фоновой плазмы дневного выступа.

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Беспалов П.А. Выступы плазмосферы и вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 2. С. 214–223.

3.14.4. Проанализировано поле излучения при импульсном излучении гармонического сигнала, когда эффекты временной и пространственной дисперсии оказывают существенное влияние на задержку и расплывание квазигармонического импульса. Детально рассмотрено влияние электромагнитной, дисперсионной и столкновительной поправок в дисперсионном уравнении на вид поля. Подробно проанализирована структура поля вблизи резонансного конуса: в частности, рассмотрены эффекты группового запаздывания и аномального расплывания сигнала. Построенная теория объясняет результаты ионосферного эксперимента «OEDIPUS-C» при излучении и приеме квазигармонического импульса на частоте 100 кГц, в котором уже на расстояниях порядка десяти длин волн наблюдалось значительное запаздывание сигнала приблизительно на 0,1 мс, а также значительное расплывание импульса (в несколько раз) при начальной длительности 0,3 мс. Рисунок 5 наглядно иллюстрирует эти выводы. Исследованы также некоторые аспекты обратной задачи электродинамики: показана роль гладкости распределения заряда на антенне в формировании поля, а также найден класс гладких распределений заряда на антенне, создающих заданную структуру поля. Проанализирован вопрос установления гармонического сигнала.

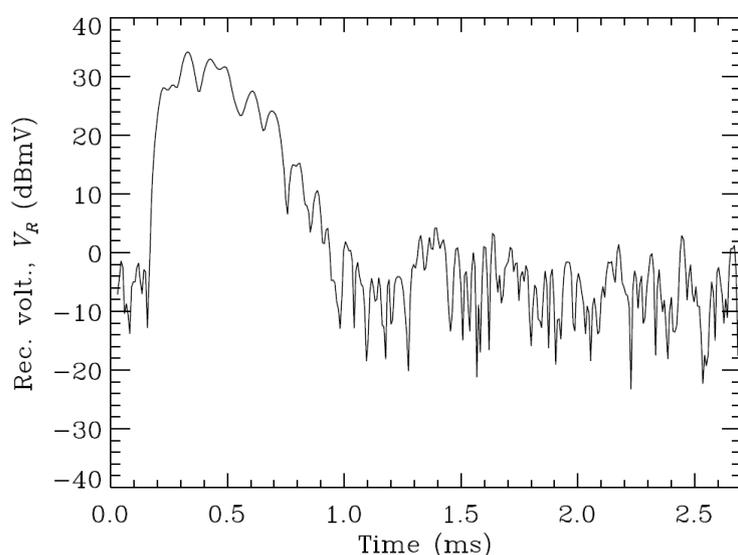


Рис. 5 Характерный профиль огибающей импульса на частоте 100 кГц, на терминале приемной антенны. Начальная длительность импульса 0.3 мс; расстояние между передатчиком и приемником 1230 м

Чугунов Ю.В., Широков Е. А. Нестационарное квазиэлектростатическое поле излучение дипольных антенн в магнитоактивной плазме в резонансной полосе частот // Известия вузов. Радиофизика. 2011. - Т. 54, №7. - С. 512-524.

3.15. Исследование различных типов магнитных возмущений в ходе бурь и супербурь (ИСЗФ СО РАН)

Разработана модель расположения в возмущенной магнитосфере системы трех генераторов продольных токов северного полушария. Впервые получены (на примере двух событий) временные ряды значений интенсивности продольных токов северного полушария в каждой из трех зон Ииджимы и Потемры. Графики рис. 1 а и б показывают, что в ходе возмущения сохраняется, в пределах ошибок измерений, равенство интенсивностей продольных токов зоны 1 и суммы продольных токов зон 2 и 0. Это означает, что три генератора составляют единую систему. Обнаружена также асимметрия утро-вечер, т.е. неравенство интенсивностей двух продольных токов разного знака в каждой зоне Ииджимы и Потемры, одновременно наблюдаемых в утреннем и вечернем секторах (Рис. 1 в). Предложена модель образования асимметрии, в которой кроме

продольных токов замкнутых в ионосфере северного полушария, представлены также продольные токи, связывающие два полушария.

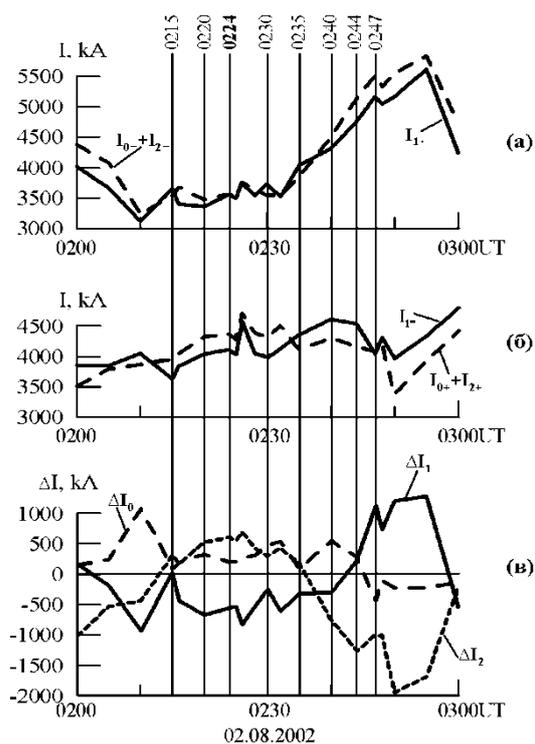


Рис.1. Изменения в ходе суббури 02.08.2002 интенсивности продольных токов зоны 1 (сплошные линии) и суммы интенсивностей зон 0 и 2 (штриховые линии): а – утренний сектор; б – вечерний сектор; в – разности интенсивностей втекающего и вытекающего продольных токов каждой из зон 1, 2 и 0.

Mishin V. M., M. Forster, M. A. Kurikalova, and V.V. Mishin. The generator system of field-aligned currents under the data of April 06, 2000, superstorm // Adv. Space Res. 2011, V. 48, p. 1172-1183.

Mishin V.M., Sapronova L.A. and Mishin V.V. Field-aligned currents in the disturbed magnetosphere and their generator system. // Doklady Earth Sciences 2011. V. 440, p. 1353-1357.

Мишин В.М., Сапронова Л.А. и Мишин В.В. Продольные токи в возмущённой магнитосфере и их генераторы // Доклады Академии Наук. Сер. Геофизика 2011, Т.440, №3, с.408-411.

3.16. Глобальная МГД-неустойчивость геомагнитного хвоста (ИСЗФ СО РАН)

Решена задача о гидромагнитной устойчивости хвоста магнитосферы при обтекании его потоком плазмы солнечного ветра. Использована модель магнитосферного хвоста в виде неоднородного по радиусу плазменного цилиндра. Для качественного анализа решение поставленной задачи найдено аналитически в приближении ВКБ. При этом граница плазменного цилиндра рассматривалась в виде тангенциального разрыва. Для более реалистичной модели с границей в виде размытого переходного слоя решение найдено численно. Показано, что локальная неустойчивость резкой границы магнитосферного хвоста развивается, когда скорость обтекающего магнитосферу потока плазмы превышает скорость Альфвена на этой границе. Этот вывод подтверждается численным решением задачи для модели с границей в виде размытого переходного слоя. Однако инкремент неустойчивости в этом случае оказывается много меньше, чем для модели с резкой границей. Кроме локальной неустойчивости границы, обнаружены неустойчивые глобальные моды колебаний магнитосферного хвоста, амплитуда которых практически не меняется по его сечению (см. рис.1).

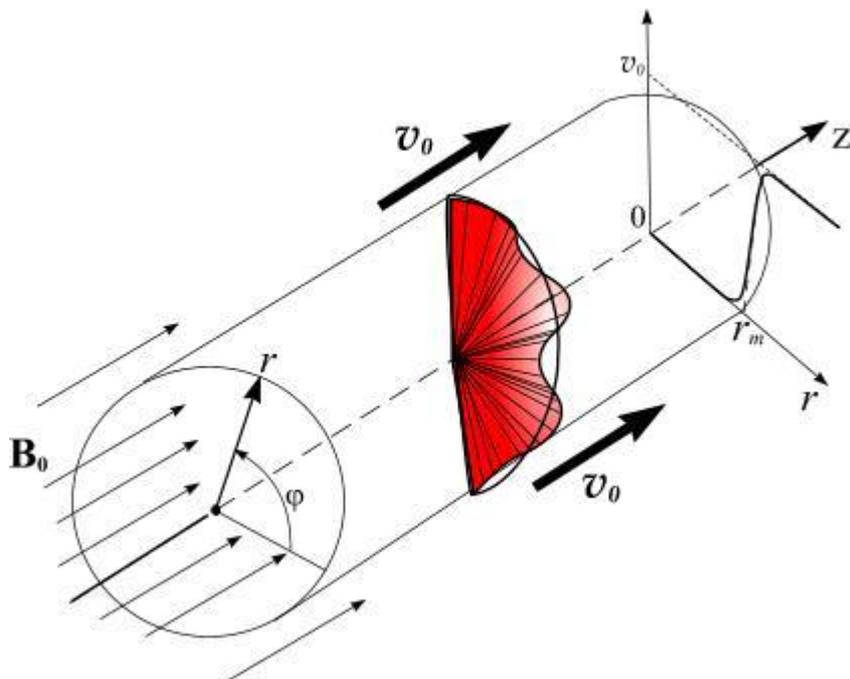


Рис.1. Цилиндрическая модель геомагнитного хвоста, обтекаемого потоком плазмы солнечного ветра (со скоростью v_0). Показано распределение амплитуды неустойчивых «глобальных» мод колебаний в одном из секторов поперечного сечения хвоста.

Эти моды остаются неустойчивыми при сколько угодно малой скорости обтекающего магнитосферу потока плазмы. При достижении определенного критического значения скорости обтекания глобальные моды МГД-колебаний становятся устойчивыми. Неустойчивость глобальных мод может служить источником сверхнизкочастотных (~ 1 мГц) колебаний, наблюдаемых в ночной части магнитосферы Земли.

Leonovich A.S. MHD-instability of the magnetotail: Global modes // Planetary and Space Science 2011, V. 59, P. 402.

Leonovich A.S. A theory of MHD-instability of an inhomogeneous plasma jet // J. Plasma Phys. 2011, V. 77, P. 315.

3.17. Возбуждение магнитосферного МГД-резонатора неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца (ИСЗФ СО РАН)

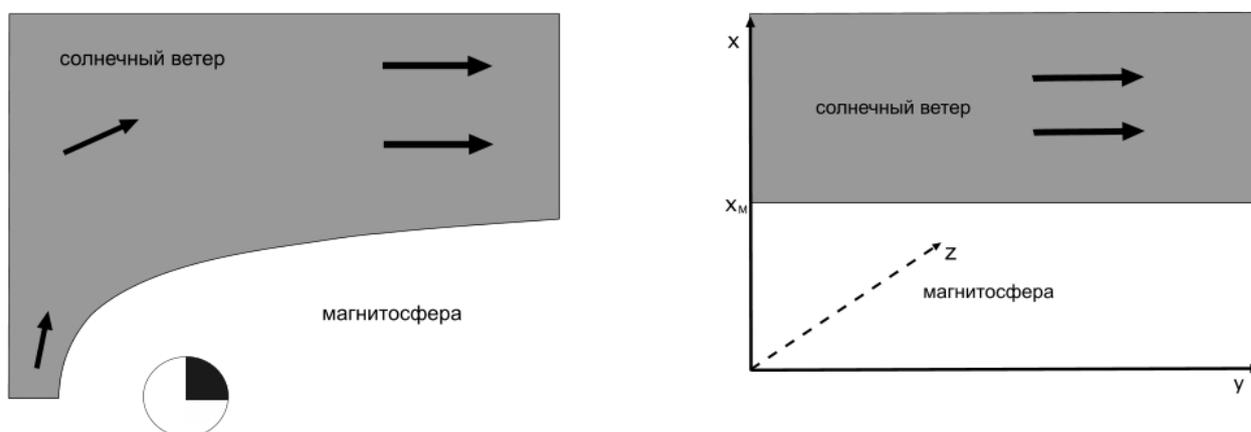


Рис.1 Соответствие элементов реальной среды и используемой одномерной модели.

В рамках одномерно-неоднородной модели магнитосферы и прилегающей к ней области солнечного ветра аналитически исследована неустойчивость Кельвина - Гельмгольца. Показано, что наличие в магнитосфере МГД – резонатора (обусловленное неоднородностью магнитосферы и скачком параметров среды на ее границе - магнитопаузе) решающим образом сказывается на свойствах неустойчивости. Колебания системы образуют дискретный набор собственных мод, которые определяются волновым вектором k_t вдоль тангенциального разрыва и номером моды $n = 0, 1, 2, \dots$, который играет роль волнового числа по координате нормальной к границе раздела. Получены аналитические выражения для частоты и инкремента неустойчивости каждой моды и для функций, описывающих ее пространственную структуру. Все эти величины как от параметра зависят от скорости солнечного ветра V_w , а точнее – от величины $\omega_w = k_t V_w$ - доплеровского сдвига частоты. Каждая мода имеет по параметру ω_w нижний порог неустойчивости и острый максимум инкремента на собственной частоте магнитосферного резонатора. При значениях ω_w ниже порога неустойчивости свойства моды существенным образом зависят от характера неоднородности солнечного ветра. Рассмотрены три случая: однородный ветер, ветер в котором скорость звука при удалении от магнитопаузы растет и ветер, в котором она падает.

Мазур В.А., Д.А. Чуйко. Возбуждение магнитосферного МГД – резонатора неустойчивостью Кельвина - Гельмгольца // Физика плазмы, 2011. Т. 37. С. 979.

3.18. Структура и устойчивость сцепленных альфвеновской и дрейфово-компрессионной мод в неоднородной магнитосфере (ИСЗФ СО РАН)

Изучена пространственная структура и устойчивость сцепленных альфвеновской и дрейфово-компрессионной мод в рамках гирокинетики, в модели магнитосферы, учитывающей кривизну магнитных силовых линий, и неоднородность плазмы и магнитного поля поперек магнитных оболочек. Плазма рассматривалась как состоящая из двух компонент: холодной фоновой плазмы ($T \sim 100$ эВ) и компоненты со значительно меньшей плотностью, состоящей из энергичных частиц ($T \sim 10$ кэВ) с распределением Максвелла по скоростям. Показано, что колебания локализованы в двух областях прозрачности альфвеновской и дрейфово-компрессионной (рис.1).

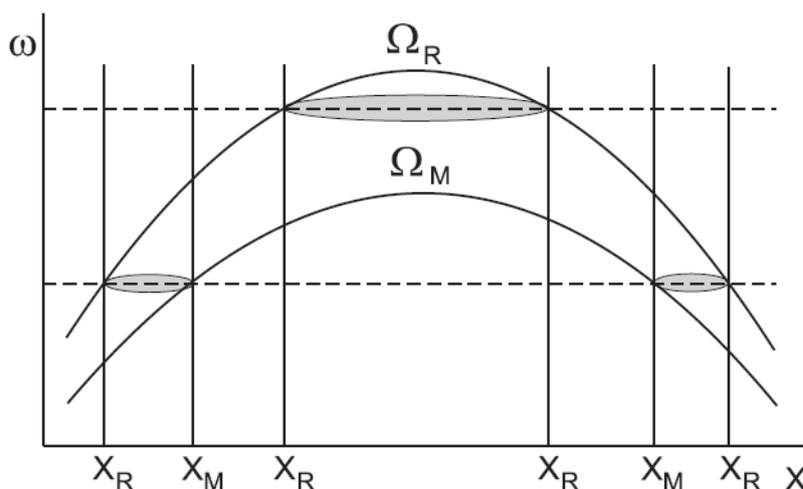


Рис. 1 Пример поведения резонансной частоты (индекс “М”) и частоты отсечки (индекс “R”) дрейфово-компрессионной моды в магнитосфере. Области прозрачности показаны серыми овалами.

Обе области ограничены поперек магнитных оболочек резонансной поверхностью и поверхностью отсечки, где радиальная компонента волнового вектора обращается в

бесконечность и ноль, соответственно. Наиболее значимым результатом является существование дрейфово-компрессионного резонанса. На поверхности этого резонанса продольная компонента магнитного поля волны имеет особенность в виде полюса, а азимутальная компонента – логарифмическую. Также найдены условия неустойчивости. Показано, что в альфвеновской области прозрачности неустойчивость возникает при отрицательном градиенте температуры плазмы (уменьшение температуры с расстоянием от Земли). Для альфвеновской моды неустойчивость не приводит к нестационарному волновому поведению: инкремент неустойчивости стремится к нулю при приближении к резонансной поверхности, и энергия, полученная от частиц, полностью поглощается на этой поверхности из-за каких либо диссипативных процессов. В дрейфово-компрессионной области прозрачности необходимым условием возникновения неустойчивости является наличие положительного градиента температуры плазмы (рост температуры с расстоянием от Земли). Здесь инкремент неустойчивости почти не зависит от радиальной координаты, следовательно, полученная энергия не поглощается полностью, что приводит к увеличению амплитуды волны со временем.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Spatial structure and stability of coupled Alfvén and drift compressional modes in non-uniform magnetosphere: Gyrokinetic treatment // Planet. Space Sci. 2011, V. 59, P. 1613

3.19. Физические условия на трассе полета космического аппарата к Юпитеру и его спутнику Европе (НИИЯФ МГУ + ИКИ)

Исследованы физические условия на трассе полета планируемой российской миссии к Юпитеру и его спутнику Европе. Обобщены известные данные и модели радиационных поясов Юпитера и его магнитного поля. Представлены предварительные результаты расчета радиационных нагрузок и потоков энергичных заряженных частиц. Выполнена оценка радиационных условий вблизи Европы с учетом влияния спутника на потоки частиц с различными энергиями с целью оптимизации траектории.

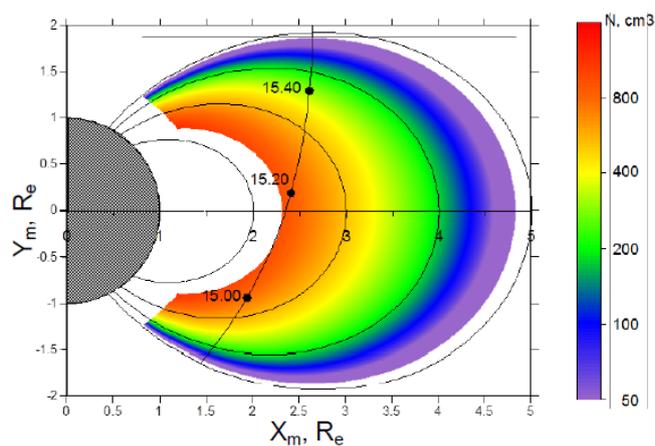
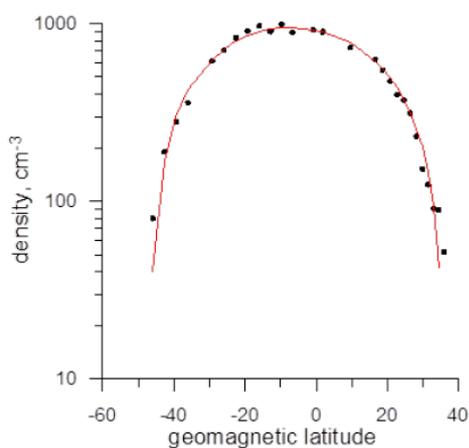
Podzolkо, M.V.; Getselev, I.V.; Gubar, Yu.I.; Veselovsky, I.S.; Sukhanov, A.A. Charged particles on the Earth-Jupiter-Europa spacecraft trajectory. *Advances in Space Research*, 2011, Volume 48, Issue 4, p. 651-660. DOI: 10.1016/j.asr.2010.11.011

Отв.: Веселовский И. С., д.ф.-м.н., проф., т. 939-1298, veselov@dec1.sinp.msu.ru

4. Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы

4.1. Полуэмпирическое моделирование распределения плазмы в плазмосфере Земли (ИКИ)

С использованием результатов измерений холодной плазмы в эксперименте АЛЬФА-3 на спутнике ИНТЕРБОЛ-1 (1995-2000 гг.) разработана полуэмпирическая двумерная модель плазмосферы Земли, которая позволяет по измерениям вдоль одного пролета спутника через плазмосферу восстановить распределение плазмы во всей меридиональной плоскости. Модель также хорошо описывает данные космического аппарата IMAGE. Модель основана на уравнениях, описывающих распределение плазмы в плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального этапа заполнения плазмосферных оболочек. Параметры построенной модели имеют ясный физический смысл.



На рисунке слева показано сопоставление зависимости плотности холодной плазмы от геомагнитной широты λ вдоль орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-1 2 марта 1996 г. (точки) с модельной зависимостью (сплошная кривая).

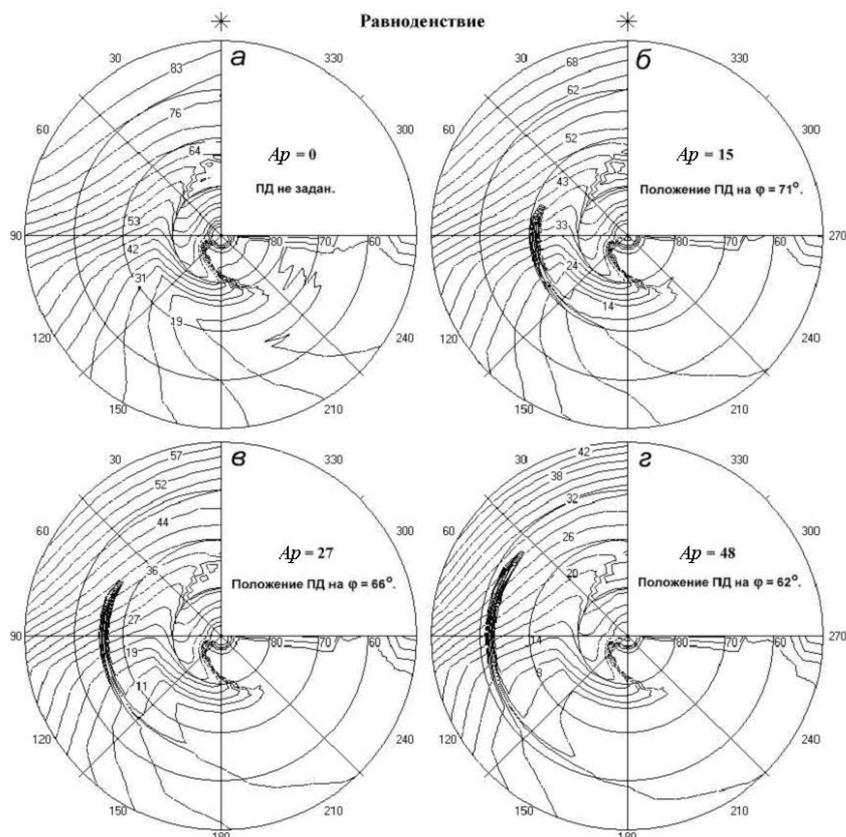
В правой части рисунка показано распределение холодной плазмы в меридиональной плоскости утренней плазмосферы, восстановленное по измерениям 2 марта. Линией с временными метками показана орбита спутника ИНТЕРБОЛ-1. Тонкими черными линиями показаны L -оболочки.

Kotova G.A., Verigin M.I., Bezrukikh V.V., Aken'tieva O.S., Solar influence on plasmasphere and modeling of 3D plasmaspheric density distribution, in: Third workshop "Solar influence on magnetosphere, ionosphere and atmosphere", Book of Abstracts, Sozopol, Bulgaria, 6-10 June 2011, p.12.

Отв.: Котова Г.А., к.ф.-м.н., с.н.с., kotova@iki.rssi.ru

4.2. Моделирование эффектов поляризационного джета в высокоширотной ионосфере (ИКИ)

Проведены модельные расчеты распределения максимальной электронной плотности в области F ионосферы в спокойных условиях и при воздействии поляризационного джета (ПД). Показано, что при наличии электрического поля поляризационного джета формируется узкий и протяженный по долготе провал в электронной плотности (см. панели б, в, г на рисунке).



Картини изолиний равной электронной плотности N_e (в ед. 10^4 см^{-3}). а- спокойный период равноденствия без включения дополнительного локального электрического поля. б, в, г – изолинии при скоростях западного дрейфа 500 м/с, 1000 м/с и 1000 м/с

Khalipov V.L., Stepanov A.E., Golicov I.A., Popov V.I., Bondar' E.D., A study of polarization jet influence on the structure of subauroral ionosphere, in: Third workshop "Solar influence on magnetosphere, ionosphere and atmosphere", Book of Abstracts, Sozopol, Bulgaria, 6-10 June 2011, p.20.

Отв.: Халипов В.Л., к.ф.-м.н., н.с., khalipov@iki.rssi.ru

4.3. УНЧ волны в верхней ионосфере по данным синхронных спутниковых и наземных наблюдений (ИКИ)

Проведено исследование пространственной и поляризационной структуры различных типов УНЧ волн ($Pc3$, $Pi2$) в верхней ионосфере на низкоорбитальном спутнике СНАМР и на сети наземных среднеширотных станций. Особенностью зарегистрированных сигналов было то, что на наземных магнитометрах они были лучше выражены в Н компоненте, в то время как в верхней ионосфере они содержали значительную продольную компоненту (или компоненту сжатия) магнитного поля. Построена аналитико-численная модель взаимодействия разных типов МГД волн с многослойной системой магнитосфера - ионосфера - атмосфера - Земля. Построенная теория позволила количественно интерпретировать данные наблюдений и определить физическую природу волн в верхней ионосфере. Вопреки общепринятым представлениям, оказалось, что волны $Pc3$ и $Pi2$ типов преимущественно обусловлены быстрой магнитозвуковой волной, а не альвеновскими колебаниями.

Pilipenko V., E. Fedorov, B. Heilig, M. J. Engebretson, P. Sutcliffe, and H. Luehr, ULF waves in the topside ionosphere: Satellite observations and modeling, "The Dynamic Magnetosphere", IAGA Special Sopron Book Series, vol.3, eds. W. Liu and M. Fujimoto, Chapter 14, Springer, 257-269, doi: 10.1007/978-94-007-0501-2, 2011.

Отв.: Пилипенко В.А., д.ф.-м.н., 8-903-6184666, pilipenko_va@mail.ru

4.4. По данным спутников CLUSTER протестированы параметры модели лампы обратной волны, предложенной В.Ю. Трахтенгерцем в качестве механизма генерации хоровых ОНЧ излучений (ИПФ + ИПГ + ИКИ)

С помощью анализа скорости изменения частоты в хоровых элементах, зарегистрированных на спутниковой системе CLUSTER, определено среднее значение и распределение безразмерного параметра, характеризующего «ступеньку» на функции распределения. Эти значения согласуются с результатами численного моделирования хоровых элементов, выполненного на основе модели лампы «обратной волны».

Titova, E., Kozelov, B., Demekhov, A., Santolik, O., Macusova, E., Decreau, P., Rauch, J-L., Trotignon J-G., Gurnett, D., Pickett, J., Testing of the backward wave oscillator model by spectral characteristics of VLF chorus elements, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, HP1.25, August 13-20, 2011 Istanbul, Turkey. Abstract Book & Papers. ISBN 978-1-4244-5118-0, 2011. (<http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/HP1-25.pdf>)

Kozelov, B.V., Titova, E.E., Demekhov, A.G., Santolik, O., On statistical distribution of characteristics of chorus element generation, XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, HP1.27, August 13-20, 2011 Istanbul, Turkey. Abstract Book & Papers, ISBN 978-1-4244-5118-0, 2011. (<http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/HP1-27.pdf>)

Отв.: Е.Е. Титова, к.ф.-м.н., в.н.с., lena.Titova@gmail.com

4.5. Теоретически исследовано рассеяние свистовых волн на мелкомасштабных флуктуациях плотности в околоземной плазме (ИКИ)

Рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях является одним из процессов, обеспечивающих выход свистовых волн, распространяющихся по магнитосферным траекториям, в атмосферу. Рассмотрено рассеяние на неоднородностях, занимающих конечную область пространства и имеющих различные спектральные функции, которые характерны для неоднородностей в F-слое ионосферы. Получено выражение для плотности потока энергии волн, рассеянных в конус прохождения, то есть, выходящих в атмосферу.

Kuzichev, I.V. On whistler-mode wave scattering on small scale density irregularities. XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, HP1.9, August 13-20, 2011 Istanbul, Turkey. Abstract Book & Papers, ISBN 978-1-4244-5118-0, 2011. (<http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/HP1-9.pdf>)

Отв.: И.В. Кузичев, аспирант, м.н.с., Mar-cuss@yandex.ru

4.6. Продольные токи и конвекция ионосферной плазмы, обусловленные азимутальной компонентой ММП (ИКИ + ААНИИ)

Две модели - статистическая модель продольных токов (ПТ), построенная по данным низкоорбитальных спутников и численная модель глобального распределения электрического потенциала - использовались для выделения структур ПТ и конвекции ионосферной плазмы, контролируемых азимутальной компонентой ММП в различные сезоны года. Декомпозиция полных картин ПТ и конвекции на элементы, каждый из которых контролируется определенным параметром ММП, позволила обнаружить в обоих полушариях асимметричные элементы, обусловленные действием V_u компоненты ММП, которая создает разность потенциалов между полярными шапками противоположных полушарий. В области открытых силовых линий геомагнитного поля обнаруживается ПТ

кругового сечения, который втекает в одном полушарии и вытекает в другом, а также межполушарные ПТ на более низких широтах, В картинах конвекции этому соответствуют круговые вихри, закручивающиеся вокруг полюса.

Результаты модельных расчетов были подтверждены измерениями скорости течения ионосферной плазмы с помощью радара EISCAT, расположенного на Шпицбергене вблизи границы полярной шапки. Статистический анализ 8-летнего ряда данных, полученных в экспериментах при ориентации антенны в направлении полярной шапки, показал, что направление и интенсивность азимутального течения плазмы связаны со знаком и величиной V_y ММП. Были получены количественные соотношения между скоростью конвекции и значением V_y ММП в различных секторах местного времени, показывающие, что эффект наиболее выражен в полуденной и полуночной областях. В утреннем и вечернем секторах связь между скоростью течения и V_y ММП ослаблена, что объясняется значительным сдвигом границ полярной шапки вдоль утренне-вечернего меридиана под действием V_y . Новым является обнаружение несимметрии отклика скорости конвекции и сдвига границы шапки на утренней и на вечерней сторонах при изменении V_y , а именно, эффект более явно выражен в секторе 00–12 MLT, чем в секторе 12-24 MLT. Отсутствие симметрии может быть связано с межполушарными ПТ, неоднородностью ионосферной проводимости, генерацией электрического поля в магнитосфере при взаимодействии с ММП и топологией магнитосферы.

Lukianova R. and A.Kozlovsky, IMF V_y effects in the plasma flow at the polar cap boundary, Ann. Geophys., 29, 1305-1315, 2011.

Лукьянова Р.Ю., А. Козловский, Ф. Христиансен, Продольные токи в зимнем и летнем полушариях, обусловленные V_y ММП, Геомагнетизм и аэрономия (принято в печать), 2011.

Отв.: Лукьянова Р.Ю., к.ф.-м.н., renata@aari.nw.ru

4.7. Фронтальные структуры спорадических слоев E ионосферы (ИКИ)

Образование фронтальных структур спорадических слоев E известно по наблюдениям ионосферы посредством ионозондов, начиная с 60-х годов прошлого века. В наблюдениях такие структуры могут следовать одна за другой с характерной длиной волны (10–40) км и ассоциируются с так называемыми квазипериодическими радиоотражениями от E области ионосферы, регистрируемыми посредством когерентных радаров. На сегодняшний день, сложилась концепция, по которой образование фронтальных крупномасштабных структур в E и F областях ионосферы, а также их взаимное влияние, обуславливается плазменными неустойчивостями (E_s и Перкинса соответственно). Однако ряд экспериментов указывает на неправдоподобие такого сценария взаимодействия областей ионосферы и на существование в нижней ионосфере дрейфующих фронтальных структур, которые явно не соответствуют развитию E_s - неустойчивости. В настоящей работе показано, что развитие фронтальных структур в E области ионосферы допускает иное и более адекватное наблюдениям описание. Предложен механизм образования фронтальных структур, основанный на неустойчивости экмановского типа, когда важным оказывается учет спиральности крупномасштабного потока и турбулентности в нейтральной компоненте слабоионизованной плазмы ионосферы.

О.Г.Чхетиани, С.Л.Шалимов. О механизме образования фронтальных структур ионосферных спорадических слоев E, Геомагнетизм и аэрономия, 2012 (принята к печати).

Отв.: Чхетиани О. Г., д.ф.-м.н., тел.8-495-333-22-23, ochkheti@mx.iki.rssi.ru

4.8. Результаты наблюдения F области ионосферы двумя радарными. (ИКИ+ААНИИ)

По одновременным наблюдениям двух радаров (радар некогерентного рассеяния EISCAT, Svalbard и SuperDARN, Hankasalmi) F области ионосферы вблизи полярной шапки обнаружено, что спектральная ширина ионосферного эха обычно увеличена. Показано, что эта ширина растет с ростом ионосферного электрического поля. Эта зависимость может быть объяснена в терминах нелинейной эволюции градиентно-дрейфовой неустойчивости при каскадном процессе распада неоднородностей в диапазоне от сотен метров до метров.

Kozlovsky A., Shalimov S., Koustov A.V., Lukianova, R., Turunen. Dependence of spectral width of ionospheric F region HF echoes on electric field // J. Geophys. Res., 2011, Volume 116, Issue A7, CiteID A07302, doi: 10.1029/2011JA016804

Отв.: Шалимов Сергей Львович, д.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, pmsk7@mail.ru

4.9. Существование областей дополнительной ионизации в ионосфере над грозowymi разрядами (ИКИ)

Теоретически и экспериментально обосновано предположение о существовании областей дополнительной ионизации в ионосфере над грозowymi разрядами и их связи с TLE (transient luminous events). Показано, что эти области являются источником вторичных КНЧ-УНЧ волн. Предложен способ определения момента заряда в спрайт-производящих грозowych разрядах.

Shalimov S., Bosinger T. Sprite-producing lightning-ionosphere coupling and associated low-frequency phenomena. // Space Sci. Rev. 2011. doi: 10.1007/s11214-011-9812-x

Отв.: Шалимов С. Л., д.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, pmsk7@mail.ru

4.10. Исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра (ИЗМИРАН)

На основе данных обратного некогерентного рассеяния (ISR) впервые даны оценки количественного вклада отдельных аэрономических параметров в формирование сезонных в цикле солнечной активности вариаций NmF2 в области средних широт. Используемые для оценок аэрономические параметры свободны от неопределенностей эмпирических моделей верхней атмосферы и солнечного EUV, что является отличительной чертой данного подхода. Разные температуры верхней атмосферы зимой и летом, наложенные на температурную зависимость константы скорости реакции $O^+ + N_2$, дают разный ход NmF2 в цикле солнечной активности. Показано, что эффект насыщения в зависимости NmF2 от уровня солнечной активности не сводится просто к уменьшению отношения O/N_2 или к вариациям потока EUV в солнечном цикле (как предполагается в ряде работ), но связан с вариациями коэффициента линейной рекомбинации ионов O^+ через температурную зависимость константы скорости реакции $O^+ + N_2$.

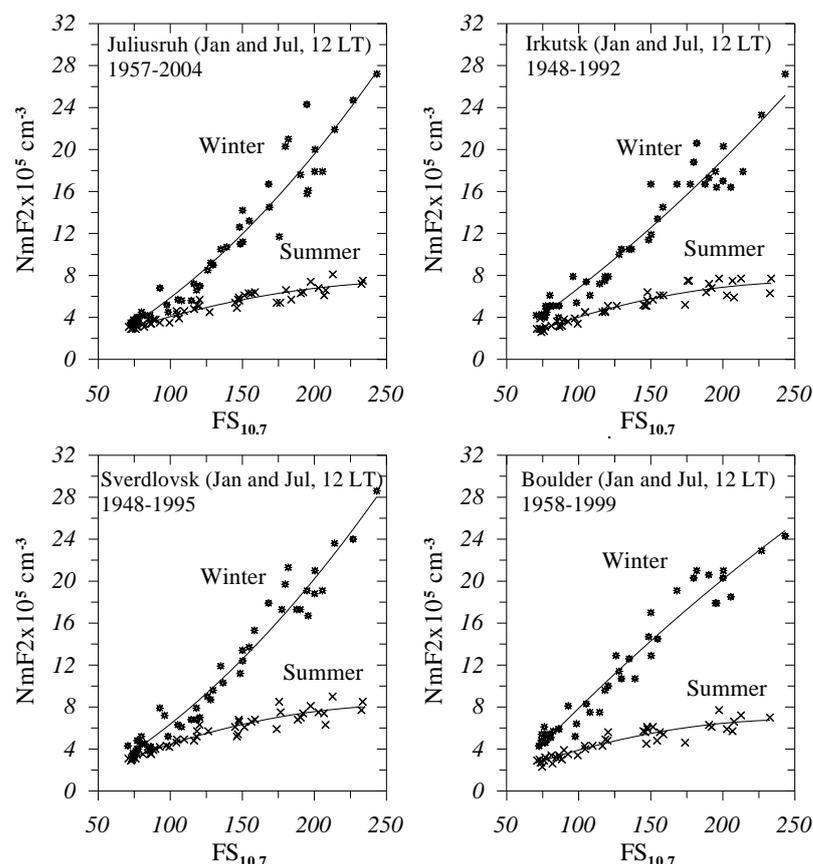


Рис. 1. Вариации месячных медианных полуденных значений NmF2 для зимы (декабрь, звездочки) и лета (июль, крестики) для ряда среднеширотных станций ионосферного зондирования, расположенных в разных долготных секторах. FS_{10.7} – 12-месячное скользящее среднее F_{10.7} взято в качестве показателя уровня солнечной активности. Для зимних кривых видна тенденция к загибу вверх, а для летних, напротив, вниз.

Mikhailov A. V., and Perrone L. On the mechanism of seasonal and solar cycle NmF2 variations: A quantitative estimate of the main parameters contribution using incoherent scatter radar observations // J. Geophys. Res., 116, A03319, doi:10.1029/2010JA016122, 2011.

4.11. Исследование влияния солнечного ветра на ионосферу Земли по данным навигационных спутниковых систем (ИРЭ)

4.11.1. Алгоритмы определения полного электронного содержания ионосферы по данным навигационных спутниковых систем

Навигационные приемники, работающие по фазовым и кодовым измерениям дальности, позволяют с достаточно высокой точностью определить полное электронное содержание по формулам

$$TEC = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + N_{12} + \sigma_L] \quad \text{- в случае фазовых измерений,}$$

$$TEC = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + \sigma_P] \quad \text{- в случае дальномерных измерений.}$$

В работе было рассмотрено изменение параметра TEC в период осеннего и весеннего равноденствия в 23 цикле солнечной активности, соответствующей минимуму и максимуму данного цикла. Как показано в [1], уровень геомагнитной активности и связанных с ней явлений имеет сезонный ход. Он выше в периоды равноденствия и ниже в период солнцестояния. Объясняется эта закономерность геометрией магнитных полей. В

марте Земля движется по орбите вокруг Солнца южным полушарием вперед. Положительная магнитная составляющая межпланетного магнитного поля (ММП), проектируясь на магнитную ось Земли, создает компоненту ММП, направленную к северу, не усиливающую магнитную активность. Осенью Земля входит в положительный сектор ММП. В положительном секторе возникает компонента, направленная к югу, усиливающая вероятность возникновения геомагнитных возмущений.

4.11.2. Характеристики 23 цикла солнечной активности

23 цикл солнечной активности начался в мае 1996 года и завершился в декабре 2008 года. Он продолжался 12,6 года. Максимум сглаженных среднемесячных чисел Вольфа за время цикла равнялся 120,8, а минимум -1,7. В общей сложности 820 дней цикла пятен на Солнце не наблюдалось. Распределение чисел Вольфа W в 23 цикле показано на рис.1. Основные характеристики этого цикла практически полностью соответствуют характеристикам солнечных циклов средней величины. Развитие 23 цикла полностью укладывается в схему развития ему подобных, для которых (см. рис.2). $130 > W > 80$. Геофизические характеристики 23 цикла солнечной активности представлены в табл.1.

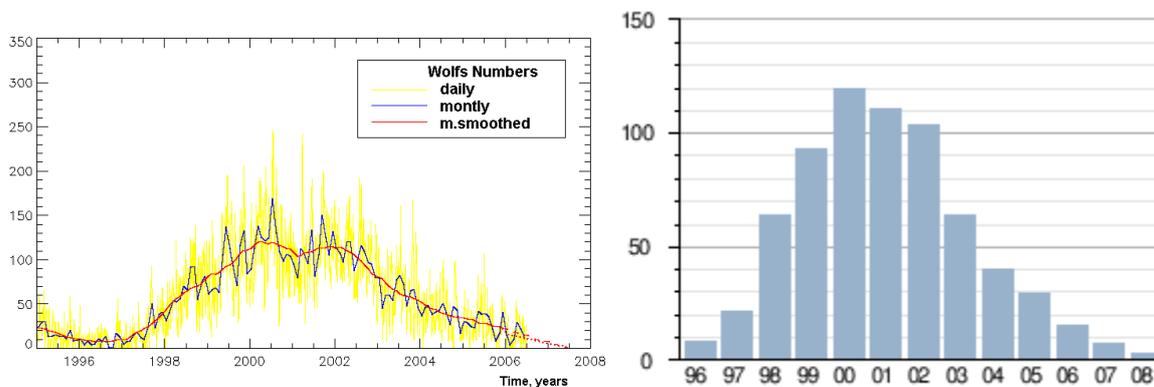


Рис.1 Распределение чисел Вольфа в 23 цикле Солнечной активности [SIDC data]

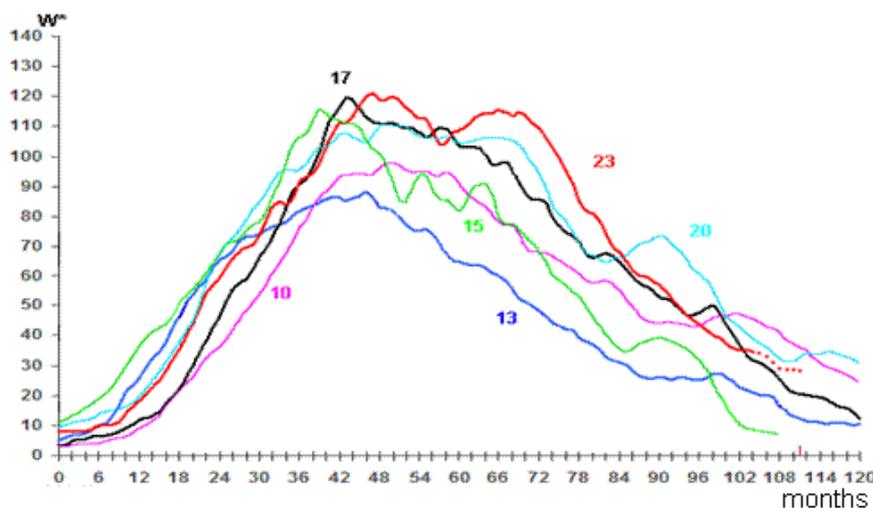


Рис. 2. Семейство солнечных циклов средней величины [2].

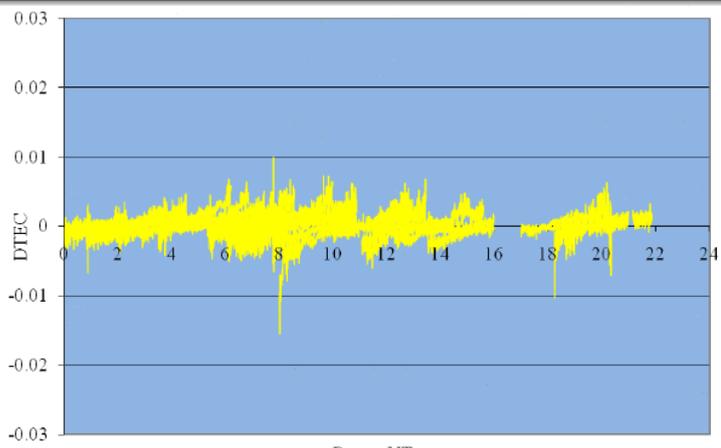
Таблица 1. Характеристики геофизической аномальности 23-го цикла солнечной активности [http://antivictory.org].

Год	Характеристик потока ультрафиолетовой радиации X-ray			Характеристики геомагнитной активности по индексу Kx		
	Период аномального устойчивого фона выше класса "С", сутки	Кол-во вспышек максимальной мощности класса "X"	Кэфф. аномальности потока X-ray	Количество экстремально-сильных магнитных бурь	Период экстремальной возмущенности магнитосферы, час	Кэфф. геомагнитной аномальности
1996	0	1	0,0	1	3	0
1997	1,5	3	0,003	6	24	0,003
1998	1,7	14	0,05	9	66	0,008
1999	63	4	0,17	5	33	0,004
2000	112	14	0,31	11 (1-Kx9)	78 (9-Kx9)	0,009
2001	153	20 (2 выше класса X9)	0,42	10	69	0,008
2002	151	9	0,42	9	42	0,005
2003	40	22 (3 выше класса X9)	0,11	14 (3-Kx9)	105 (12-Kx9)	0,012
2004	19	10	0,05	8 (3-Kx9)	81 (18-Kx9)	0,010
2005	25	22 (3 выше класса X9)	0,07	14 (3-Kx9)	69 (9-Kx9)	0,008
2006	3	4	0,006	4	24	0,003
2007	1	0	0	1	3	0
2008	0	0	0	1	3	0
2009	0	0	0	0	0	0
2010	4	0	0,006	1	3	0

4.11.3. Исследование суточных флуктуаций полного электронного содержания ионосферы в период максимума и минимума солнечного цикла по данным систем GPS/ГЛОНАСС

Результаты обработки навигационных данных, полученных с GPS-приемника, расположенного в г. Звенигороде Московской области, представлены на рис.3. На рис.3а,б показаны данные для весеннего равноденствия, на рис. 3в,г – для осеннего. Из приведенных данных хорошо видно, что в период максимума солнечного цикла значения параметра *DTEC* примерно в 2-3 раза превышают аналогичные данные для периода минимума солнечной активности. Кроме этого, сама форма кривых, полученных в течение суток по всем наблюдаемым спутникам, существенно отличается. В период максимума солнечного цикла скорость изменения полного электронного содержания *DTEC* существенно выше. В это время и выше флуктуации параметра *DTEC*. Это справедливо для весеннего и осеннего равноденствия.

Детальный анализ результатов обработки показал, что в день весеннего равноденствия в период максимума солнечного цикла наблюдались значительные вариации скорости изменения полного электронного содержания. Эти вариации наблюдались в ночные (1-2 часа по *UT*) и утренние (4-8 часов по *UT*) часы. Наиболее сильные вариации наблюдались с 6 до 8 часов *UT* (рис.4) и с 1.5 до 2.5 часов *UT* (рис.5). По местному времени это соответствовало полуденному и ночному времени. Вариации в ночное время суток носили быстро осциллирующий характер с амплитудой 0.02 *TECU*/с, в дневное время наблюдались периодические вариации параметра *DTEC* с периодом 20-30 минут. Длительность вариаций ПЭС, наблюдаемых в ночное время суток, составляет около 1 часа и соответствует, по всей видимости, структуре перемещающегося волнового пакета с характерными периодами *T* от 5 до 10 минут. Вероятность появления перемещающихся волновых пакетов, как указано в [3], практически не зависит от уровня геомагнитной активности.



а)

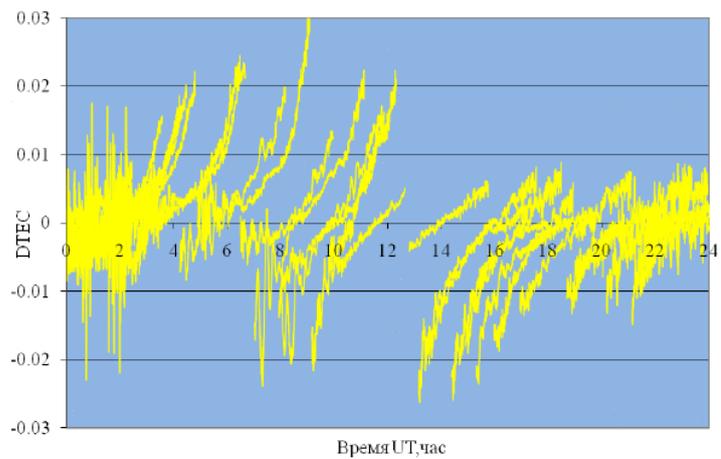


Рис. 3. Скорость изменения ПЭС в период весеннего равноденствия в минимуме а) и максимуме б) 23 цикла солнечной активности.

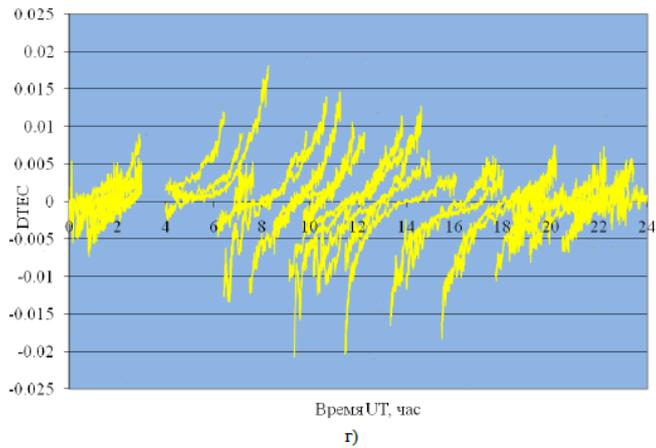
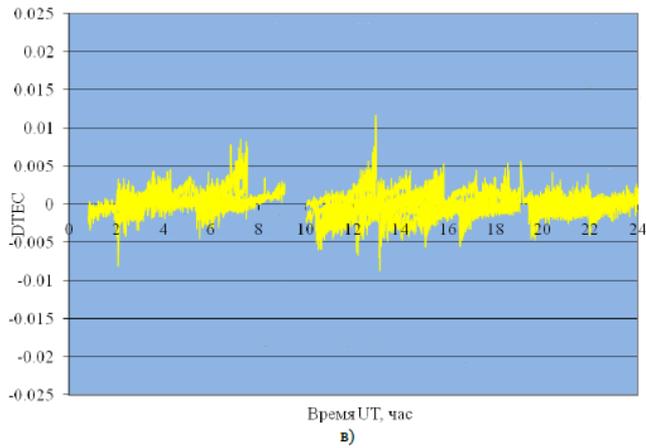


Рис. 3. Скорость изменения ПЭС в период осеннего равноденствия в минимуме в) и максимуме г) 23 цикла солнечной активности

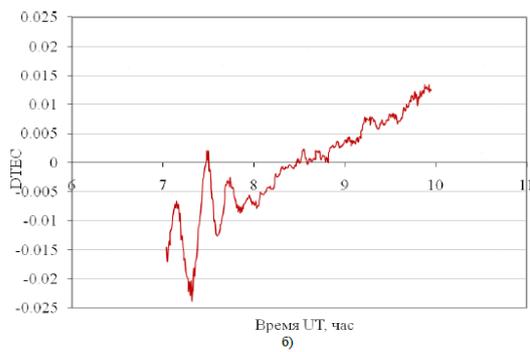
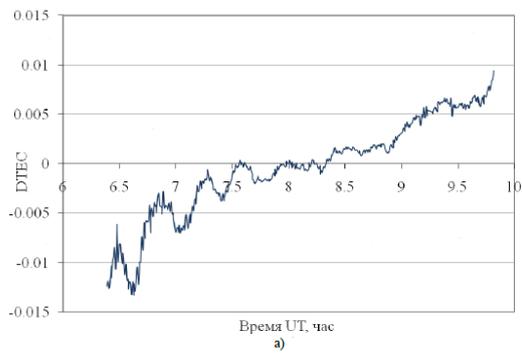


Рис. 4. Вариации скорости изменения полного электронного содержания в максимуме 23 цикла солнечной активности в период осеннего равноденствия а) и весеннего б).

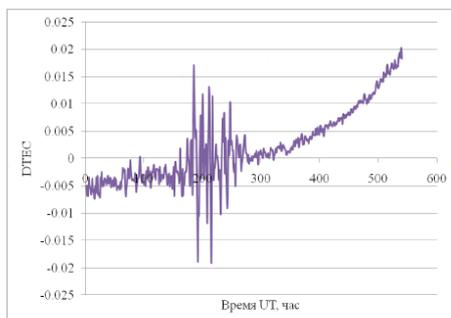
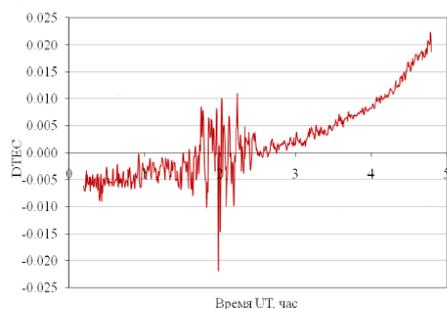


Рис. 5. Вариации скорости изменения полного электронного содержания в максимуме 23 цикла солнечной активности в период весеннего равноденствия в ночное время суток.

Отв.: д.ф.-м.н. Смирнов В.М.

4.12. Исследование ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания (ИРЭ)

4.12.1. Анализ экспериментальных данных спутника CHAMP

Для иллюстрации возможности определения положения и наклона плазменных слоев ниже используются данные спутника CHAMP, полученные с использованием радиосигналов спутника навигационной системы GPS на частоте 1575,42 МГц (сеанс, проведенный июля 2003 года, начало 21 ч 08 м LT, координаты 71.4 N, 67.3 W), в которых имеются интенсивные квазирегулярные амплитудные и фазовые вариации. Рефракционные ослабления радиозатменных сигналов, $X_a X_p$, полученные в результате обработки вариаций интенсивности и эйконала, показаны на рис.2 (панель I, кривые 1 и 2) в виде функций высоты перигея h лучевой траектории GTL . Ускорение эйконала a было определено численно методом двойного дифференцирования полинома второй степени, построенного методом наименьших квадратов на скользящем временном интервале $t 0.5 c$. Временной интервал соответствует размеру вертикальной зоны Френеля ~ 1 км, при величине вертикальной компоненты скорости погружения радиолуча в ионосферу ~ 2.1 км/с. Рефракционное ослабление $p X$ получено с помощью уравнения (1) по найденным из экспериментальных данных значениям a . Величина m была получена из орбитальных данных. Рефракционное ослабление X_a было определено из амплитудных данных с помощью метода наименьших квадратов с усреднением на том же временном интервале 0.5 с. Вариации рефракционных ослаблений, $X_a X_p$ являются когерентными, что указывает на равенство фаз. Изменения ослаблений, $X_a X_p$ вызваны, по-видимому, воздействием трех ионосферных слоев в трех интервалах высоты перигея h лучевой траектории GTL , отмеченных на рис.2 (панель I) латинскими буквами a, b и c . Интервалы a, b и c соответствуют значениям высоты h в диапазоне 50-72 км, 72-92 км и 92-116 км. Сигналы 1, 1 $X_a X_p$ когерентны в указанных интервалах. Однако амплитуды, $A_a A_p$ аналитических функций 1, 1 $X_a X_p$ различны (рис.2, панель I). Амплитуды, $A_a A_p$, определенные с помощью численного преобразования Гильберта, показаны на рис.2,

панель II (кривые 1 и 2 соответственно). Амплитуда A_a в интервалах a и b меньше, чем соответствующие значения A_p (рис.2, панель II). Противоположный случай наблюдается в интервале c (рис.2, панели I и II).

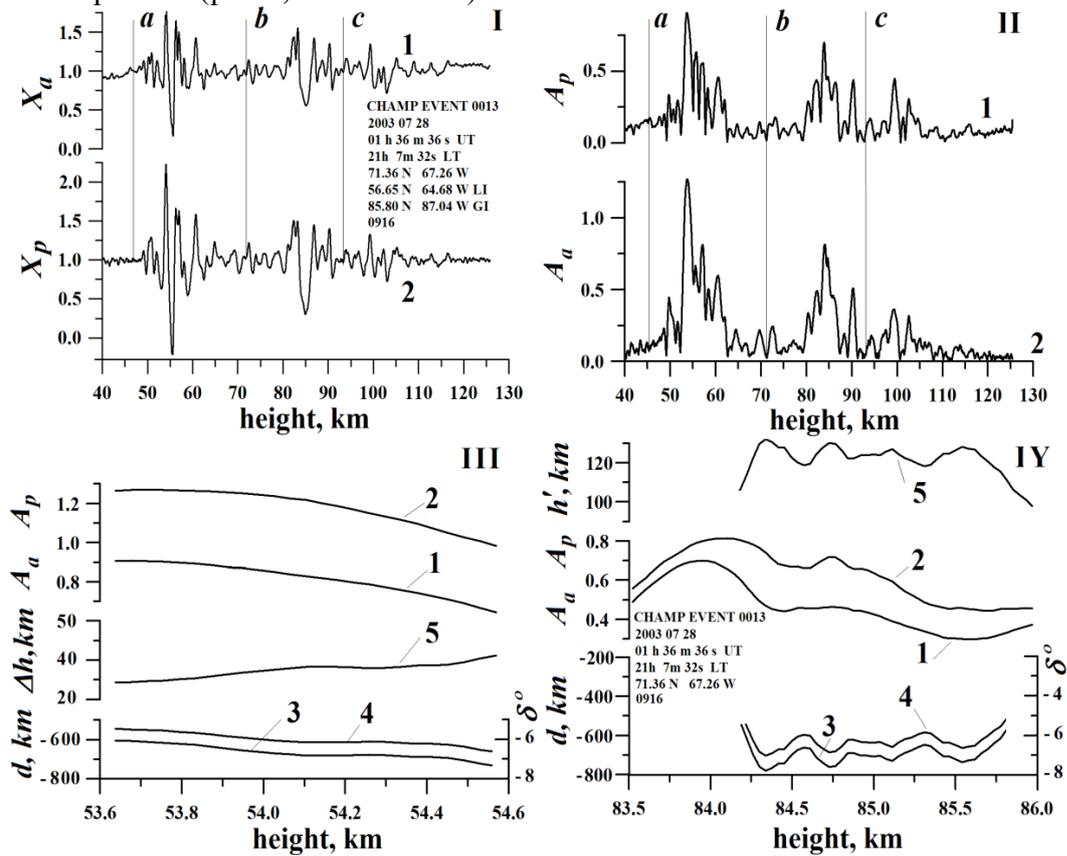


Рис. 2. **I.** Сравнение рефракционных ослаблений , X_a , X_p , определенных по вариациям интенсивности и эйконала радиозатменного сигнала на частоте f_l навигационной системы GPS (кривые 1 и 2). **II.** Амплитуда аналитических сигналов, соответствующих вариациям рефракционных ослаблений , X_a , X_p (кривые 1 and 2). **III.** Определение положения первого слоя с использованием амплитуд , A_a , A_p . **IV.** Определение положения второго слоя с использованием амплитуд A_a , A_p .

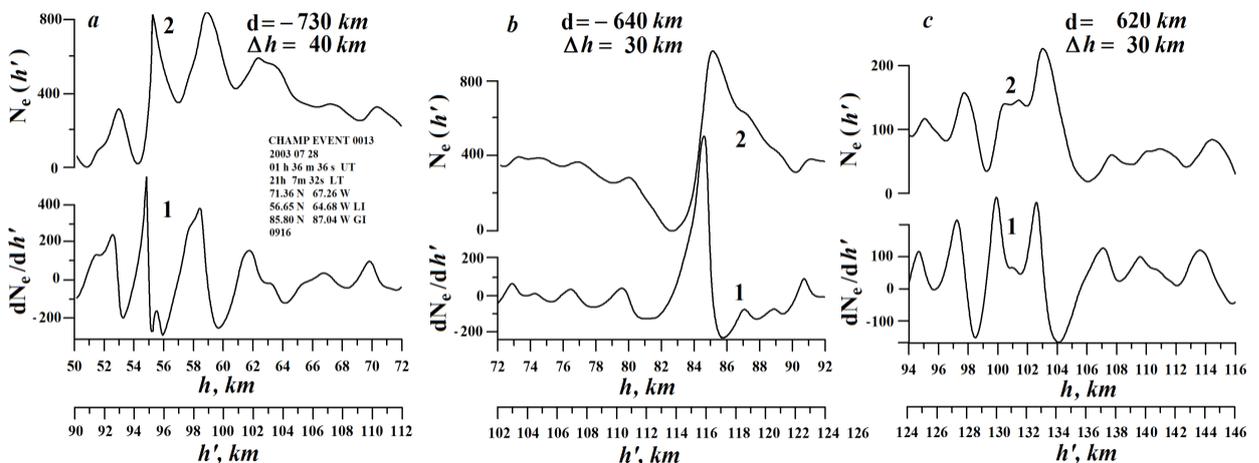


Рис. 3. Результаты определения электронной плотности и ее вертикального градиента.

4.12.2. Сравнение с радиолографическим методом обратного распространения

Предложенная методика может быть сопоставлена с радиолографическим методом определения положения плазменных неоднородностей ионосферы, введенным ранее [10,14]. Электромагнитное поле, измеренное вдоль орбитальной траектории LL' , интегрируется с

функцией Грина, соответствующей полю сферической волны в свободном пространстве для определения радиополей между передатчиком и приемником. При этом процесс определения поля в методе обратного распространения осуществляется вдоль прямых линий, касательных к радиозатменному лучу в любой точке на линии LL' [14]. Методом обратного распространения находится область, где амплитудная модуляция электромагнитного поля отсутствует или минимальна. Координаты этой области определяют положение неоднородности. Согласно работе [21] указанная область расположена вдоль фазового экрана – (линия BB' на рис. 1), где лучи, соответствующие полю обратного распространения перпендикулярны направлениям, проведенным из центра сферической симметрии O (прямые OB , OB' на рис.1). Кривая BB' близка к прямой линии, поскольку угол рефракции мал. Неточность при определении расстояния TL методом обратного распространения равна расстоянию между кривой BB' и точкой TL (рис.1). Предложенная техника представляет длину TL в виде суммы $TL d$. Систематическая погрешность введенного метода существенно меньше, чем рассмотренного метода обратного распространения.

4.12.3. Связь индекса S4 по данным спутника CHAMP с солнечной активностью в период 2002-2008 гг.

Анализ протяженной базы данных объемом около 500 тысяч сеансов радиопросвечивания, полученной с помощью спутника CHAMP в течение 2001-2008 годов позволил получить зависимость усредненного индекса S4 от времени [22,23]. Индекс S4 вычислялся для каждого радиозатменного сеанса в виде среднего от относительных вариаций интенсивности сигнала на высотах перигея луча выше 40 км, где влияние ионосферы преобладает над влиянием атмосферы. В среднем за сутки получалось около 200 значений индекса S4 для разных районов земного шара. Данные, полученные в сеансах измерений, усреднялись по временному интервалу 27 суток, и группировались по широтным зонам Земли.

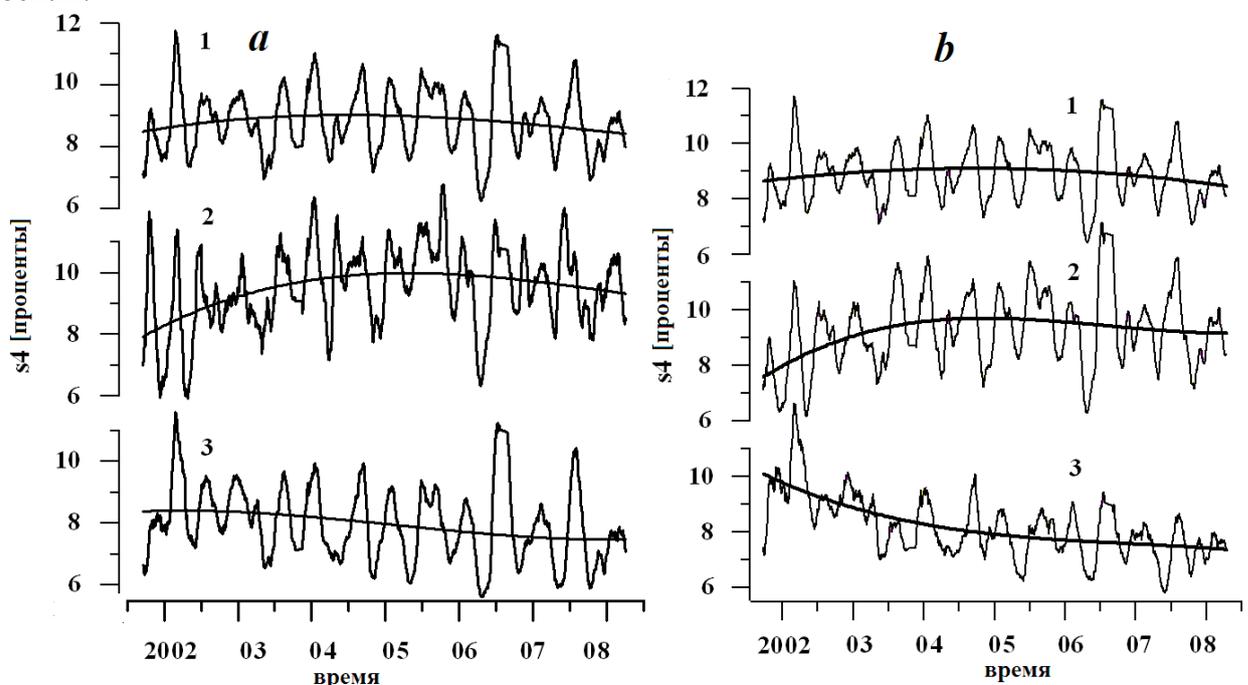


Рис. 7. Зависимость индекса S4 от времени в период 2001-2008 гг. по данным спутника CHAMP. *a*) Кривые 1-3 соответствуют (1) усредненному по всему земному шару индексу S4; (2) усредненному по экваториальным районам (широта меньше 30) индексу S4; (3) усредненному по умеренным и полярным широтам (широта больше 30) индексу S4. *b*) Кривые 1-3 соответствуют (1) усредненному по всему земному шару индексу S4; (2) усредненному по умеренным и

экваториальным широтам (широта меньше 55) индексу S4; (3) усредненному по полярным районам (широта больше 55) индексу S4. Усреднение проводилось за период 27 суток.

Необходимо отметить разную зависимость индекса S4 для дневной и ночной ионосферы в течение 2001-2008 годов. Эта зависимость показана на рис.8. Кривые 1, 2 соответствуют усредненным в интервале 27 суток по земному шару значениям индекса S4 для дневной и ночной ионосферы. Кривые 3 и 4 дают полиномиальную аппроксимацию экспериментальных данных. На рис.8 заметно некоторое отличие между долговременными изменениями индекса S4 на дневной и ночной стороне Земли, что, по-видимому, связано с разными механизмами формирования дневной и ночной ионосферы. Общая особенность данных, приведенных на рис.7 и рис.8, состоит в явно выраженной квазипериодической структуре вариаций индекса S4 с периодом 5-7 месяцев. Эта особенность подлежит дальнейшему изучению.

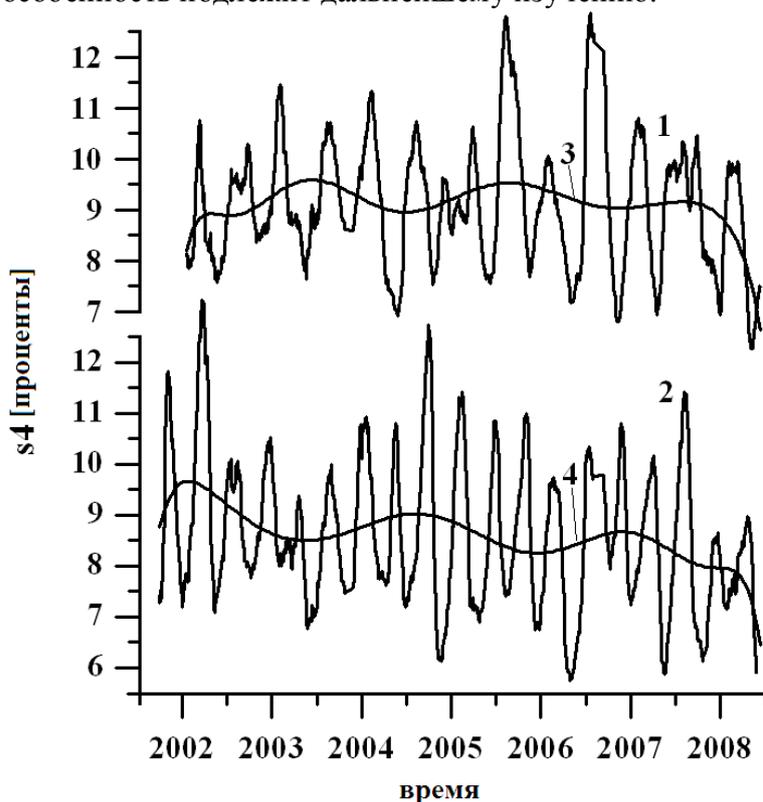


Рис. 8. Зависимость индекса S4 для дневной (кривые 1, 3 соответствуют интервалу от 08 до 18 часов местного времени) и ночной (кривые 2, 4 соответствуют интервалу от 18 до 08 часов местного времени) ионосферы в течение 2001-2008 годов. Кривые 3 и 4 дают аппроксимацию кривых 1 и 2 полиномами девятой степени

Отв.: к.т.н. Павельев А.Г., д.т.н. Яковлев О.И.

4.13. Исследование ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания (ИРЭ)

В рамках проекта анализировались возможности метода радиозондирования ионосферы Венеры с использованием высокостабильных сигналов L-диапазона с целью получения информации о структуре и физических характеристиках околопланетной плазмы.

4.13.1. Электронная концентрация в ночной ионосфере Венеры

Диапазон зенитных углов Солнца ZO в радиозатменных экспериментах КА ВЕНЕРА-15,-16 составил 50°...160°, получено в общей сложности 73 профиля N(h) в дневной ионосфере, 20 профилей вблизи терминатора и 62 профиля в ночной ионосфере [3-

5,10,11], они вошли в созданную базу данных (<http://ppi.pds.nasa.gov/>), часть которой уже является общедоступной [12].

Пространственно-временные вариации потока плазмы с дневной на ночную сторону слабо изучены. Поэтому представляет интерес сравнить $N(h)$ -профили, полученные почти одновременно в разных областях ионосферы или через земные сутки в близких областях на ночной стороне Венеры. На рис.1 и рис.2 показаны $N(h)$ -профили, демонстрирующие изменчивость ночной ионосферы в высотном интервале $110 < h < 250$ км [5,11]. Одновременное нахождение около Венеры двух КА позволило осуществить 9.11.1983 и 10.11.1983 по 4 сеанса просвечивания ночной ионосферы, орбиты оказались такие, что моменты захода и восхода разных КА отличались на ~ 3 ч. Зондируемые области при заходе КА ВЕНЕРА-15 и КА ВЕНЕРА-16 отличались на $\sim 2.5^\circ$, а при выходе на $\sim 8^\circ$ [5,11]. Сравнение попарно распределений (a,b), (c,d), (e,f), (g,h) на рис.1, показывает, что количественные характеристики ночной ионосферы Венеры (максимальная концентрация, высотная протяженность, шкала высот, форма профиля и т.д.) даже за время $\Delta t \approx 3$ ч изменяются существенно.

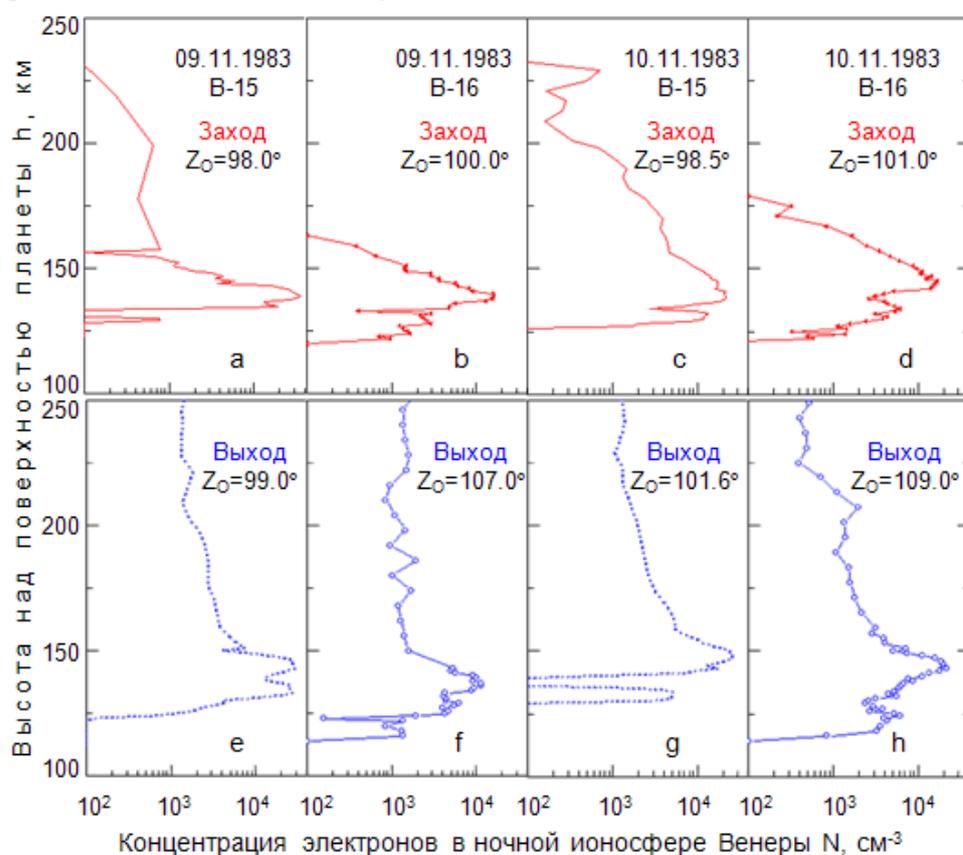


Рис. 1. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (a-d) и выходов (e-h) КА ВЕНЕРА-15,-16, полученные 09 и 10 ноября 1983 г.

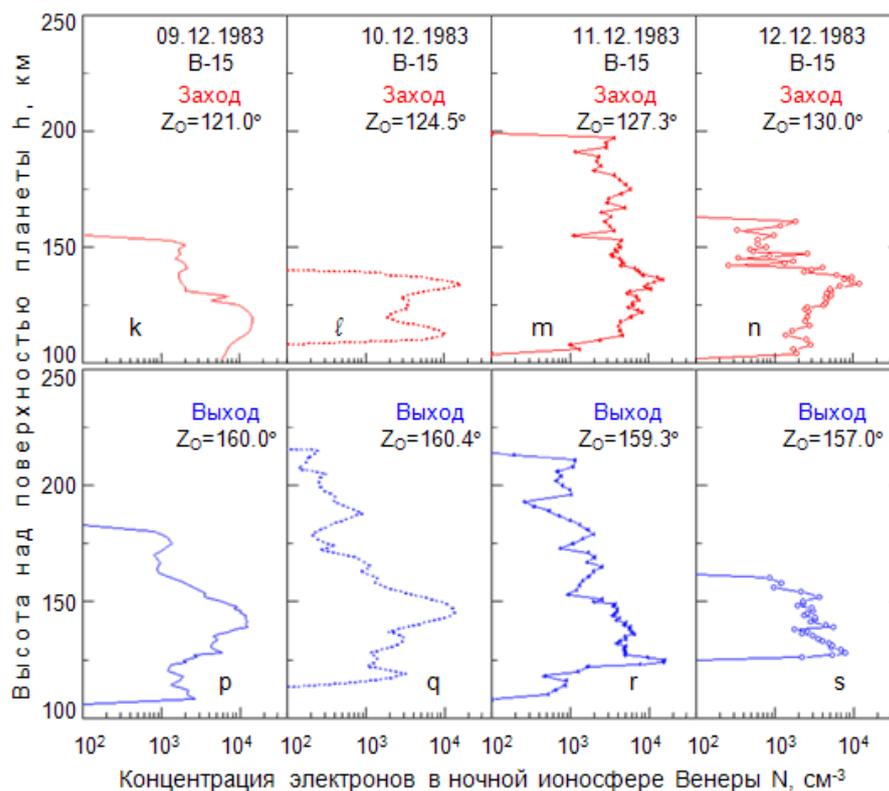


Рис. 2. Профили $N(h)$ в ночной ионосфере по данным радиозаходов (k-n) и выходов (p-s) КА ВЕНЕРА-15, полученные с 09 по 12 декабря 1983 г.

При низкой активности Солнца часто наблюдалась двухслойная ночная ионосфера [11], слои могут быть сильно разнесены по высоте (на 12...22 км), но могут и не иметь четкого разделения. Двухслойные профили получены по данным КА ВЕНЕРА-9,-10 в 15 (из 22) сеансах и по данным КА ВЕНЕРА-15,-16 в 33 (из 62) сеансах [11]. В большинстве случаев концентрация в нижнем максимуме $N\ell$ меньше, чем в верхнем Nm , нижний максимум обычно нечетко выражен, он может проявляться в виде перегиба профиля $N(h)$. Величина $N\ell$ иногда сравнима с погрешностью определения $N(h)$. Распределения, в которых оба слоя четко разделены по высоте и $Nm \approx N\ell$ наблюдались меньше 10 раз, один из этих профилей показан на рис.1e, второй – на рис.2l. КА PIONEER-VENUS выявил очень мало двухслойных профилей (<20%) и в период максимальной, и в период минимальной активности Солнца [18]. Авторы радиозатменных экспериментов с КА VENUS-EXPRESS также не сообщают о регулярном появлении двухслойной ионосферы в годы низкой активности [19].

Гипотеза авторов [11] об увеличении частоты появления двухслойной ионосферы при низкой активности Солнца не нашла подтверждений. Существенное различие качественных характеристик ночной ионосферы в экспериментах [4,18,19] может быть следствием пониженной чувствительности S и X диапазонов [18,19,20] к влиянию плазмы по сравнению с чувствительностью L диапазона [4], поэтому малая концентрация плазмы нижнего слоя ионосферы могла маскироваться аппаратными шумами сигналов S и X диапазонов. Этот вопрос недостаточно исследован и требует более детального анализа, для которого необходимо увеличить соотношение между исследуемыми эффектами и аппаратными погрешностями, используя при радио-затмениях L диапазон.

4.13.2. Применение метода детектирования слоистых структур в ионосфере

В наибольшей степени достоинства сигнала L диапазона проявились после разработки метода детектирования плазменных слоев, использующего дисперсию радиоволн в плазме и теоретическое обоснование линейной связи интенсивности зондирующей ионосферу

радиоволны с изменением частоты волны [6,8] для увеличения чувствительности метода радиозатмений к ма-лым вариациям концентрации электронов. Разработанные критерии обеспечили разделение ра-диофизических эффектов, обусловленных влиянием плазмы, атмосферы и шума, что предоста-вило возможность выявления многослойных плазменных структур и в дневной, и в ночной ио-носфере [6,8]. На рис.3 представлены данные КА ВЕНЕРА-15,-16, свидетельствующие об эф-фективности нового направления исследований [6-9].

В отличие от метода дисперсионного интерферометра, основанного на анализе данных о фазе сигналов, разработанный метод выявляет неизвестные ранее свойства ионосферы путем корреляции данных о мощности с градиентом частоты сигнала. Сравнение рефракционного ослабления ДМ сигнала $X_{DM}(t)$ с вычисленным ослаблением $X_{\Delta f}(t)=1+\beta*d/dt\{\Delta f(t)\}$ [6,8], пред-ставленное на рис.3, указывает на отсутствие корреляции $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ ниже 80 км, что свиде-тельствует об отсутствии влияния плазменных слоев потому, что $\Delta f(t)$ зависит только от влия-ния плазмы. Разработанные критерии позволяют на высотах 80...110 км отделить плазменные эффекты от нарастающего в процессе погружения радиолуча влияния нейтральной атмосферы путем анализа $X_{DM}(t)$, $X_{SM}(t)$ и $X_{\Delta f}(t)$ [6,8]. Выше 80 км корреляция $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ и многочис-ленные области фокусировки и расфокусировки радиолуча свидетельствуют о влиянии слои-стых структур ионосферы.

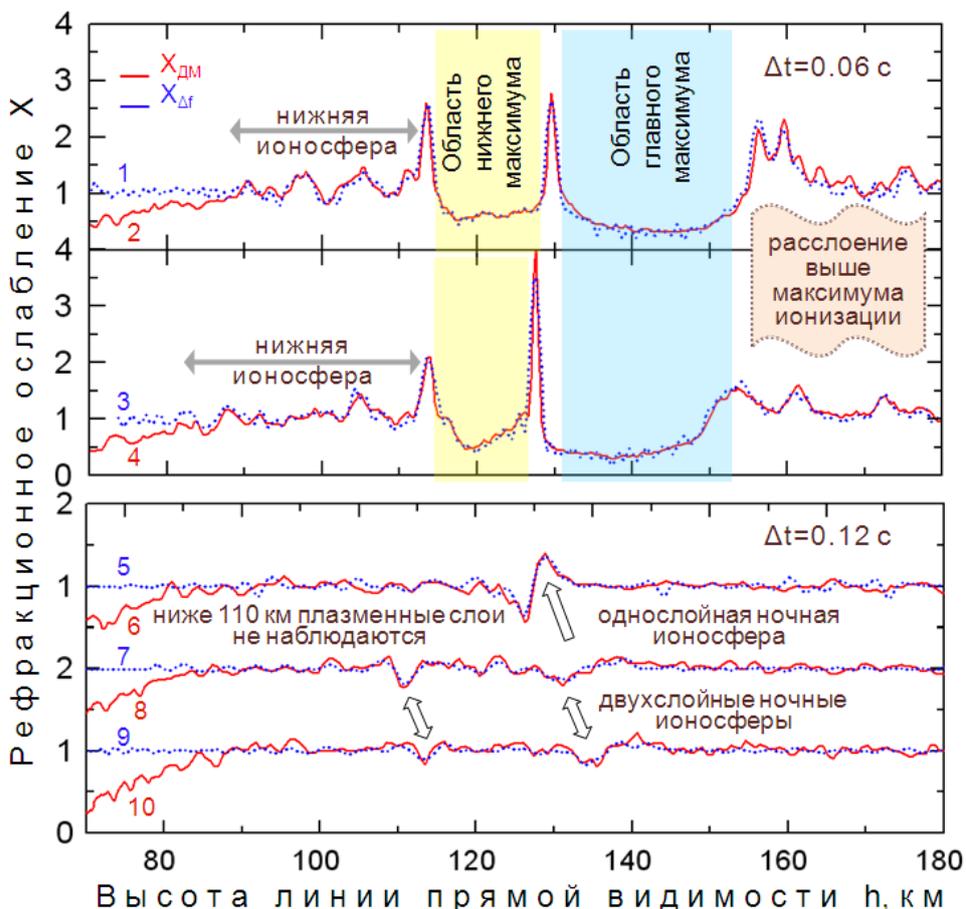


Рис. 3 Совпадение $X_{DM}(t)$ (сплошные кривые) с $X_{\Delta f}(t)$ (точки) в дневной ионосфере (кривые 1,2 и кривые 3,4) и многочисленные экстремумы свидетельствуют о слоистой структуре дневной ионосферы Венеры. Совпадение $X_{DM}(t)$ с $X_{\Delta f}(t)$ в ночной ионосфере и наличие одной (кривые 5,6) или двух (кривые 7,8 и 9,10) областей расфокусировки доказывает существование и однослойной и двухслойной ночной ионосферы Венеры.

Рис.3 демонстрирует, что сильная фокусировка радиоволны с увеличением её мощности приблизительно в 3 раза (кривые 1,2) и в 4 раза (кривые 3,4) регулярно появляется на

нижней границе слоя главного максимума (~130 км) из-за возникновения большого градиента электронной концентрации в дневной ионосфере. Рефракционные эффекты в нижней части дневной ионосферы и в ночной ионосфере на порядок слабее и обычно сравнимы с влиянием мешающих факторов, они могут быть выделены только с использованием разработанной методики детектирования плазменных слоев [6,8].

Доказательством существования плазмы на высотах 80...120 км является совпадение вариаций ХДМ(t) (кривые 2,4) с ХΔf(t) (кривые 1,3). Стабильное проявление аналогичных эффектов во всех сеансах просвечивания дневной ионосферы свидетельствует об обнаружении регулярно существующих нижних ионосферных слоев на высотах 80...120 км. При малых мешающих факторах нижняя область ионосферы наблюдалась во всех 19 сеансах для $56^\circ < ZO < 87^\circ$. В 7 сеансах из 9 при $87^\circ < ZO < 92^\circ$ нижняя ионосфера проявлялась, но эффект был сравним с шумами. Аналогичные структуры в ночной ионосфере во всех 25 сеансах при $92^\circ < ZO < 160^\circ$ отсутствуют. Обнаруженная нижняя часть дневной ионосферы Венеры может оказаться аналогом области D земной ионосферы.

Важно отметить, что новая методика позволила установить не только отсутствие нижней части ночной ионосферы, но и доказала справедливость утверждений о существовании и однослойной, и двухслойной ночной ионосферы. Ряд критиков полагали, что предположение о сферической симметрии ночной ионосферы необоснованно и два максимума на профилях N(h), рассчитанных по традиционной методике, возникают из-за асимметрии ионосферы. Совпадение величины фокусировки ХДМ(t) с ХΔf(t) на кривых 5-10 рис.3 является важным аргументом, под-тверждающим существование как однослойной (кривые 5,6), так и двухслойной (кривые 7,8 и 9,10) ночной ионосферы, кроме того, оно указывает на применимость сферически-симметричного приближения при расчетах профиля N(h) на высотах $h < 200$ км.

Арманд Н.А., Гуляев Ю.В., Гаврик А.Л., Ефимов А.И., Матюгов С.С., Павельев А.Г., Савич Н.А., Самознаев Л.Н., Смирнов В.М., Яковлев О.И. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами // Успехи физических наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 34-40. http://ufn.ru/ufn10/ufn10_5/Russian/r105j.pdf

Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф. О возможности увеличения чувствительности метода радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 5. С. 1-18. <http://jre.cplire.ru/jre/may11/3/text.pdf>

Гаврик А.Л. Использование радиосигнала L диапазона в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания // Журнал радиоэлектроники. 2011. № 8. С. 1-19. <http://jre.cplire.ru/jre/aug11/1/text.pdf>

Отв.: к.ф.-м.н. Гаврик А.Л.

4.14. Проявления солнечной активности в ионосфере Земли (ИСЗФ СО РАН)

Выполнен статистический и спектральный анализ вариаций двух основных параметров F2-слоя ионосферы, критической частоты — foF2 и высоты максимума — hmF2, зарегистрированных ионосферной станцией Иркутск (52.5° N, 104.0° E) в период с 1 декабря 2006 по 31 января 2008 года при низкой солнечной активности. Получено, что вариации foF2 и hmF2 содержат квазигармонические колебания с периодами $T_n = 24/n$ часа ($n = 1-7$), самые мощные из которых — суточные ($n=1$) и полусуточные ($n=2$). Исследованы сезонные изменения средних и медианных значений месячных рядов foF2 и hmF2, их спектров, а также амплитуды и фазы суточных и полусуточных вариаций. Показано, что в 2007 г. амплитуда суточной вариаций foF2 была максимальна в октябре–марте и минимальна в мае–августе. В зимние месяцы максимумы суточной вариации foF2 регистрировались вблизи полудня, в летние месяцы — вблизи 16 LT. Амплитуда полусуточной вариации имела два максимума: основной, в декабре–январе, и дополнительный, в мае–июле. Максимумы полусуточной вариации смещались от 00 и 12

LT зимой на 09 и 21 LT летом. В сумме, суточная и полусуточная вариации foF2 воспроизводят хорошо известные эффекты сезонной (зимней) и суточной аномалий. Сумма совпадающих по фазе суточной и полусуточной вариаций, имеющих максимальные амплитуды в зимние месяцы, даёт высокие полуденные значения foF2 в декабре (сезонная/зимняя аномалия). Сумма суточной и полусуточной вариаций с максимумами на 16 и 21 LT даёт широкий вечерний максимум foF2 летом (суточная аномалия).

Узость спектральных пиков суточной и полусуточной вариаций позволила разделить вариации foF2 и hmF2 на четыре составляющие: длиннопериодные ($T > 30$ часов), суточные ($T = 18-30$ часов), полусуточные ($T = 8-16$ часов) и короткопериодные ($T < 8$ часов), и изучить реакцию каждой из них на магнитную бурю. Для разделения был использован фильтр Мармё, не дающий фазовых сдвигов. Результаты фильтрации для вариаций foF2 в декабре 2006 г. показаны на рисунке. Видно, что в бурю 14-16 декабря 2006 г. низкочастотные вариации критической частоты F2 слоя с периодами больше 30 часов усилились, а полусуточные (08-16 часов) ослабились. Такие же изменения происходили в низкочастотной и полусуточной составляющих hmF2 (см. рис.).

Высокочастотные колебания с периодами, меньшими 8 часов, наблюдались во все дни месяца. Однако значения foF2 в этом диапазоне периодов выходят за пределы полосы $\pm 3s$ (s – среднестатистическое отклонение, отмечена на рисунках красными линиями) не чаще, чем 2 раза в сутки. Исключения составляют дни 14 и 15 декабря (магнитная буря), в которые значения высокочастотной составляющей foF2 были выше уровня $3S$ в 3 и 10 измерениях соответственно. На нижней панели рисунка показано местное время, соответствующее большим значениям высокочастотной составляющей foF2. Чёрными точками представлены события, выходящие за пределы полосы $\pm 2s$, красными — за пределы полосы $\pm 3s$. Большие значения высокочастотных вариаций foF2 регистрировались 14-15 декабря в секторе 05-22 LT, а в другие дни месяца только в дневные (06-17 LT) часы. Интенсификация высокочастотных колебаний foF2 сопровождалась усилением флуктуаций hmF2 в этом же диапазоне периодов. Полученные результаты показывают, что применение полосового фильтра Мармё, не дающего фазовых сдвигов, позволит провести автоматизированный поиск

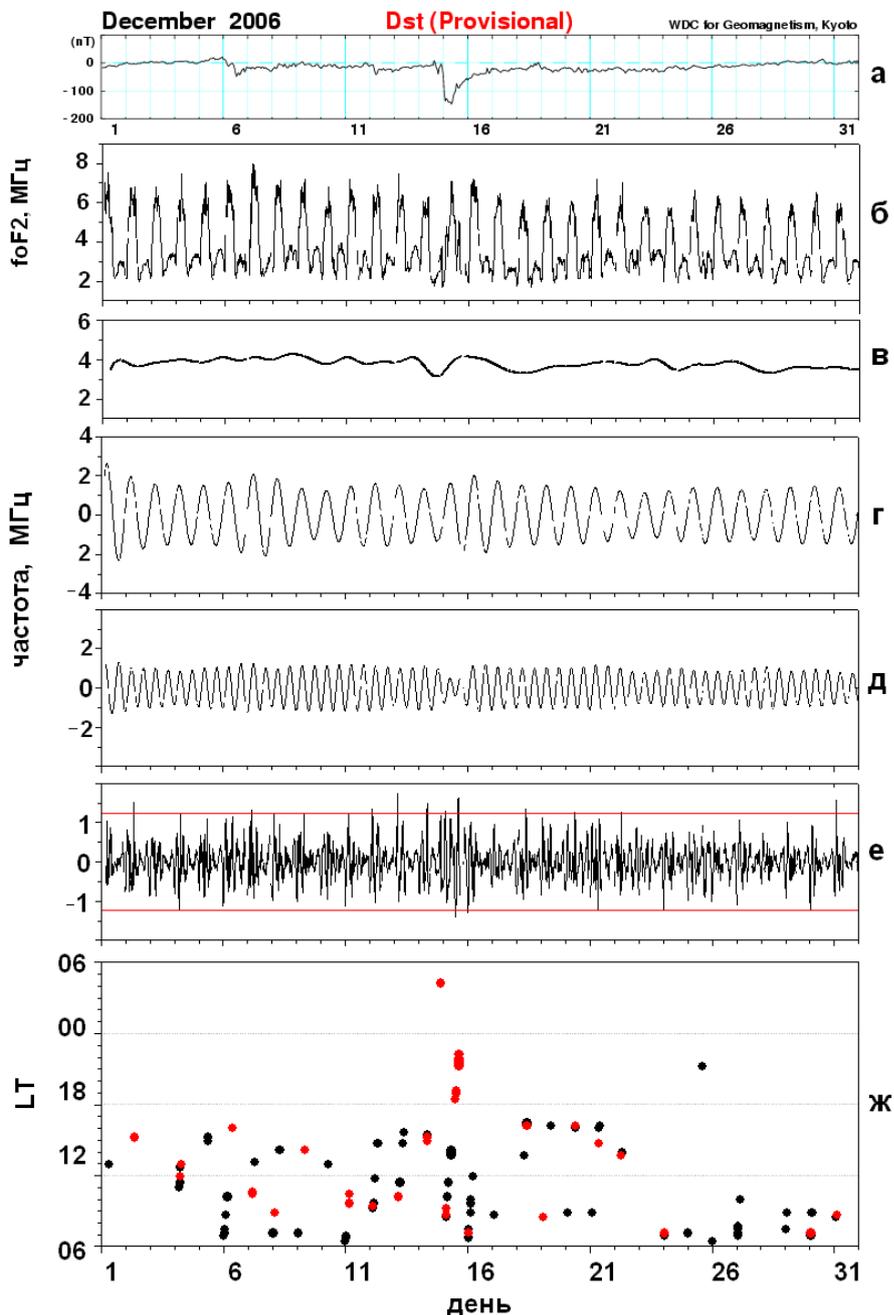


Рис. Для декабря 2006 г. показаны изменения: (а) — Dst индекса; (б) — исходных значений foF2; вариаций foF2 с периодами (в) — больше 30 часов, (г) — 18–30 часов, (д) — 8–16 часов, е — меньше 8 часов; (ж) — местного времени интенсивных короткопериодных возмущений foF2.

квазипериодических ионосферных возмущений, сопровождающих магнитные бури, сравнить их амплитудно-фазовые характеристики на разнесённых обсерваториях и, таким образом, определить природу этих возмущений.

Zolotukhina N., N. Polekh, O. Pirog. Variability of the ionosphere over Irkutsk at low solar activity // *Advances in Space Research* 2011, V. 48, P. 1606–1612.

Zolotukhina N. A., O. M. Pirog, N. M. Polekh. Geospheric Effects of the Solar Flare of December 13, 2006 // *Geomagnetism and Aeronomy* 2011, V. 51, No. 5, P. 571

5. Лабораторное моделирование плазменных процессов

5.1. Лабораторное моделирование нестационарной динамики токовых слоев (ИОФ)

5.1.1. В рамках Программы ОФН-15 в ИОФ РАН исследуется эволюция и динамика токовых слоев, которые создаются в экспериментальной установке ТС-3D (рис.1) в различных условиях, в том числе в 3D и в 2D магнитных конфигурациях. Формирование токовых слоев инициируется путем возбуждения в плазме электрического тока параллельно X линии исходного магнитного поля. В результате происходят существенные изменения исходной магнитной конфигурации, а именно значительно возрастает тангенциальная к поверхности слоя компонента магнитного поля и уменьшается нормальная компонента, что соответствует концентрации электрического тока в слое и накоплению магнитной энергии в его окрестности (рис.2). При этом направление нормальной компоненты в токовом слое остается тем же, что и в исходной конфигурации, т.е. магнитное поле токового слоя также содержит X линию.

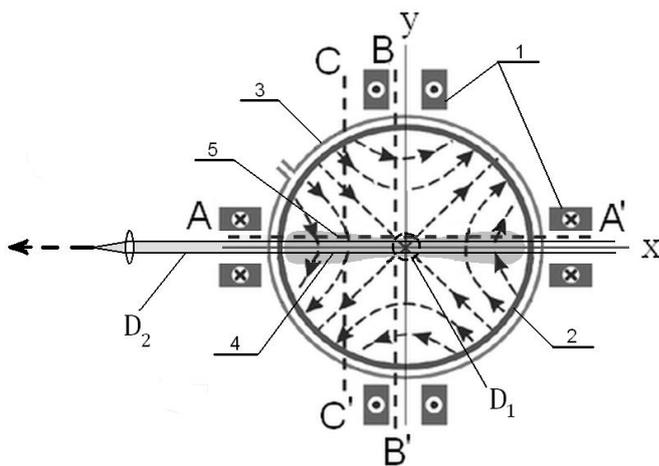


Рис.1. Схема экспериментальной установки ТС-3D, поперечное сечение.

1 – проводники с токами для возбуждения 2D (поперечного) магнитного поля с нулевой линией на оси z и силовыми линиями, которые показаны штриховыми линиями со стрелками; 2 – вакуумная камера; 3 – система витков Θ -разряда для создания начальной плазмы; 4 – токовый слой; 5 – линии (AA', BB', CC'), вдоль которых перемещались магнитные зонды; D₁ и D₂ – квазицилиндрические области, из которых регистрировалось излучение плазмы, в z - и в x -каналах, соответственно.

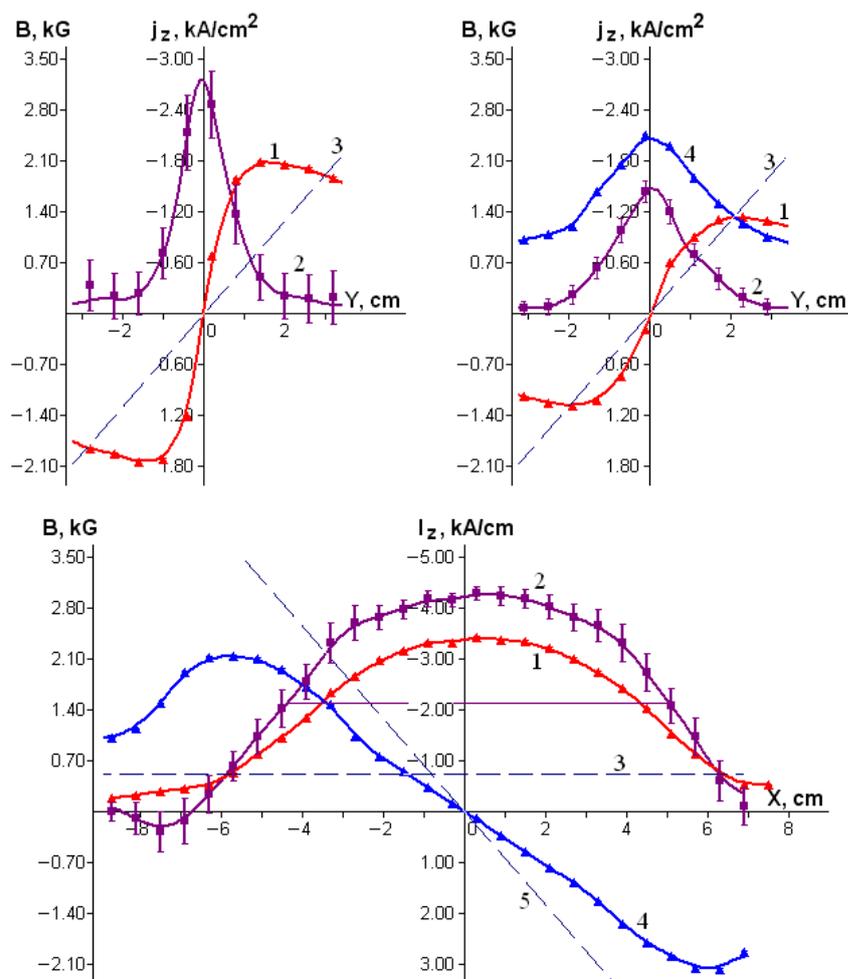


Рис.2. Распределения магнитных полей и токов при измерениях поперек и вдоль слоя.
 (а) $x = -0.8$ см (линия BB' на рис.1); (б) $x = -5$ см (линия CC' на рис.1); (в) $\Delta y = +0.8$ см (линия AA' на рис.1).
 (а), (б): 1 тангенциальная компонента $B_x^J(y)$; 2 плотность тока $j_z(y)$; 3 тангенциальная компонента исходного магнитного поля $B_x^0 = hy$; 4 нормальная компонента $B_y^J(y)$.
 (в): 1 тангенциальная компонента $B_x^J(x)$; 2 ток $I_z(x)$ в области $|y| \leq \Delta y$; 3 тангенциальная компонента исходного магнитного поля $B_x^0(x) = h\Delta y$; 4 нормальная компонента $B_y^J(x)$; 5 зависимость $-hx$.
 Условия эксперимента: Ar , $p = 28$ мТорр; $B_z = 0$; $h = 0.63$ кГс/см, $J_z^{max} = 70$ кА; $t = 1.9$ мкс.

Установлено, что время формирования слоя возрастает с уменьшением градиента поперечного магнитного поля, с увеличением продольной компоненты, при увеличении массы ионов и начального давления. Данные о распределениях магнитных полей позволили впервые определить особенности пространственно-временных изменений структуры электрических токов и электродинамических сил в токовых слоях, которые образуются в различных условиях.

При изучении особенностей распределения тока были обнаружены два новых эффекта, которые проявляются преимущественно на поздних стадиях эволюции токовых слоев и приводят к значительным изменениям магнитной структуры слоя. Во-первых, на периферии слоя происходит заметное увеличение меньшего поперечного размера, т.е. толщины токового слоя («утолщение» слоя), так что в периферийных областях ток оказывается распределенным в направлении перпендикулярном поверхности слоя по значительно большей области, чем в момент максимального сжатия (рис.3).

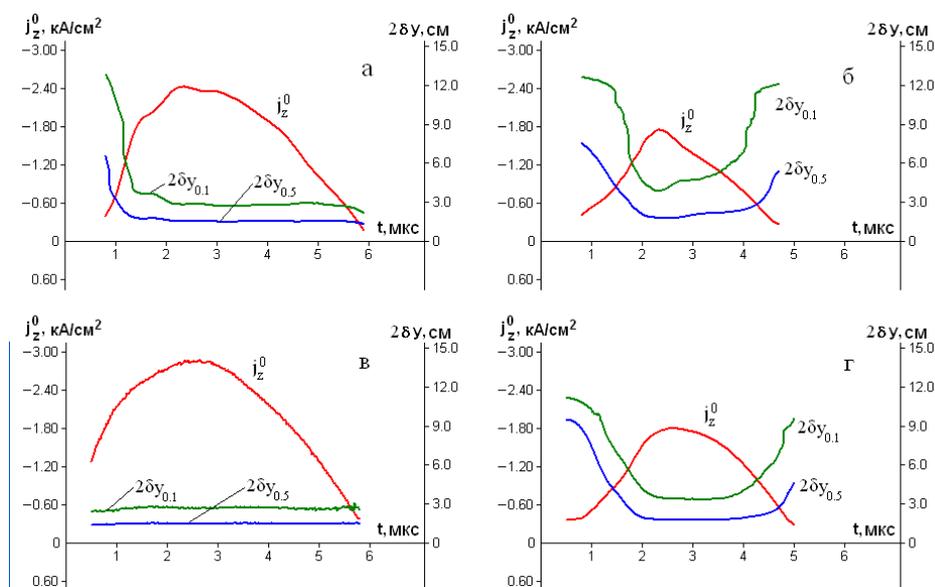


Рис.3. Изменения во времени максимальной плотности тока j_z^0 в средней плоскости токового слоя ($y = 0$) и поперечных размеров слоя, $2\delta y_{0.5}$ и $2\delta y_{0.1}$, которые определялись на двух уровнях плотности тока, при $j_z = 0.5j_z^0$ и $j_z = 0.1j_z^0$, в двух сечениях слоя: (а), (с) при $x = -0.8$ см; (б), (д) при $x = -5$ см.

Условия эксперимента:

(а), (б): Ar, $p = 28$ мТорр; $h = 0.63$ кГс/см, $J_z^{max} = 70$ кА.

(в), (г): He, $p = 320$ мТорр; $h = 0.5$ кГс/см, $J_z^{max} = 70$ кА.

Во-вторых, у боковых концов слоя обнаружено появление токов обратного направления по отношению к основному току в центральной (большей) части слоя. Прослежена временная эволюция развития обратных токов и постепенного затухания основного тока. Со временем максимальные значения обратных токов увеличиваются, а области, в которых они сосредоточены, постепенно расширяются по направлению от боковых краев к середине слоя (рис.4). Одновременно с увеличением суммарной величины обратных токов происходит затухание основного тока в центральной области (рис.5), что приводит к значительной деформации магнитного поля слоя. Возбуждение токов обратного направления было зарегистрировано практически во всех исследованных режимах, однако, момент появления обратных токов и их суммарная величина определялись теми условиями, в которых происходило формирование слоя. Отметим, что возможность существования токовых слоев с токами как прямого, так и обратного направлений была теоретически предсказана С.И. Сыроватским. Экспериментально токовые слои, в которых на определенном этапе их эволюции возникают обратные токи, были реализованы впервые. Генерация обратных токов и их усиление со временем свидетельствуют о проявлении эффектов, обусловленных динамикой замагниченной плазмы, а именно движением высокоскоростных плазменных потоков в сильном магнитном поле, см. ниже.

5.2.2. Результаты измерений магнитных полей и полученные на основе этих измерений данные о структуре электрических токов позволили рассчитать электродинамические силы, благодаря которым могут возникать движения плазмы в токовых слоях. Силы Ампера, действующие в направлении нормали к поверхности слоя, вызывают сжатие тока и плазмы, а давление плазмы препятствует сжатию, так что в конечном итоге устанавливается равновесие между силами Ампера и градиентом давления сравнительно плотной нагретой плазмы, сконцентрированной в слое.

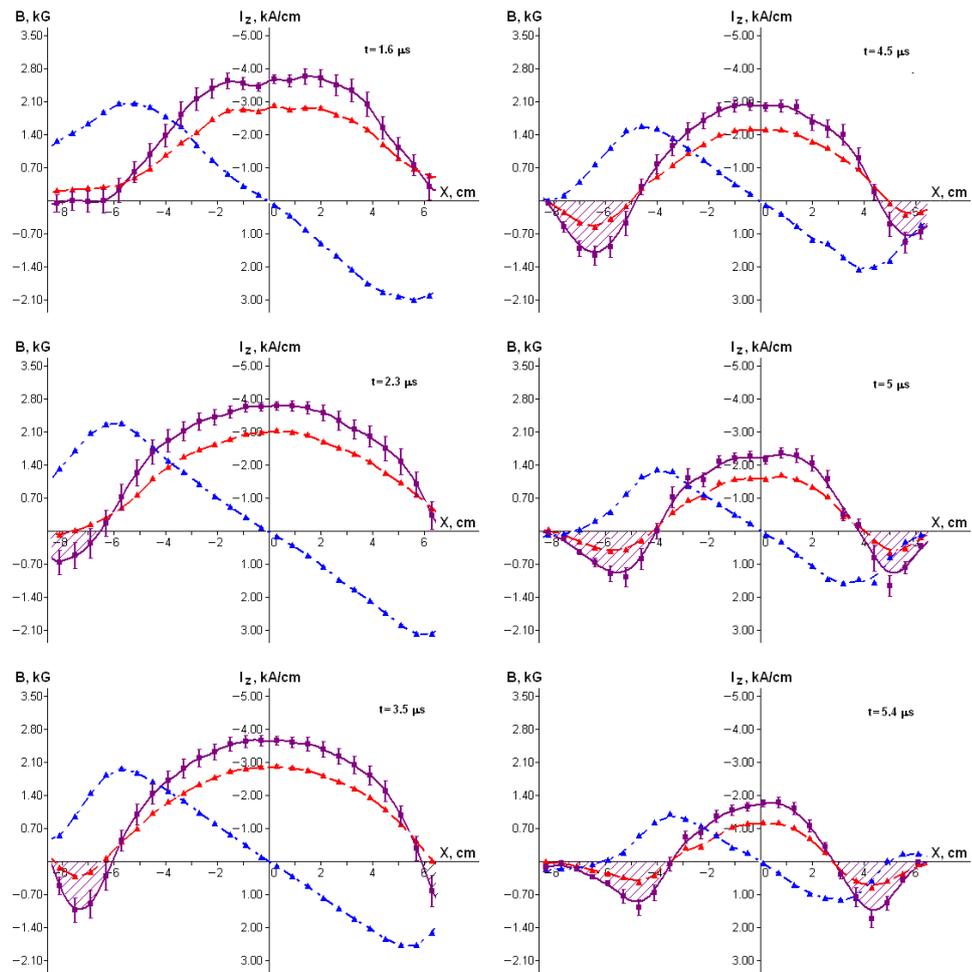


Рис.4. Распределения тангенциальной и нормальной компонент магнитного поля токового слоя: $B_x^J(x)$ – (1); $B_y^J(x)$ – (2); тока $I_z(x)$, в области $|y| \leq \Delta y = 0.8$ см – (3), в моменты времени: $t = 1.6, 2.3, 3.5, 4.5, 5.0, 5.4$ мкс. Области с обратными токами выделены штриховкой. Условия эксперимента: $Ag, p = 28$ мТорр; $B_z = 0$; $h = 0.63$ кГс/см, $J_z^{\max} = 70$ кА.

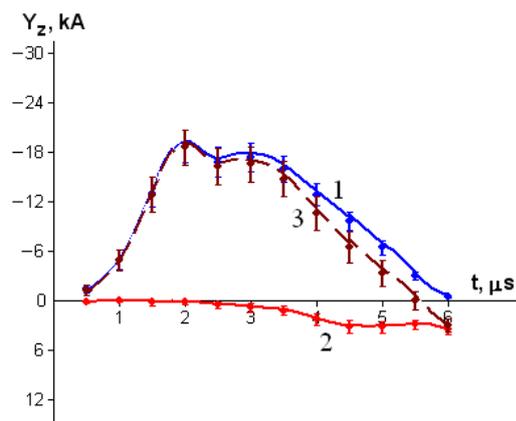


Рис.5. Зависимости от времени интегральных значений токов $I_z(x)$ в пределах половины ширины токового слоя ($-R \leq x \leq 0$). (1) - интеграл от токов прямого направления $Y_z^{(+)}(t) = \int I_z(x,t) dx$ по области ($x^R \leq x \leq 0$); (2) - интеграл от токов обратного направления $Y_z^{(-)}(t)$ по области ($-R \leq x \leq x^R$); (3) - интеграл от токов $I_z(x)$ в пределах области ($-R \leq x \leq 0$), т.е. $Y_z^{\Sigma}(t) = Y_z^{(+)} + Y_z^{(-)}$. Условия эксперимента: $Ag, p = 28$ мТорр; $h = 0.63$ кГс/см; $J_z^{\max} = 70$ кА; $\Delta y = 0.8$ см.

Вдоль поверхности токового слоя и градиент давления, и силы Ампера направлены от середины слоя наружу, к противоположным боковым краям слоя. Градиент давления вдоль поверхности слоя обычно пренебрежимо мал, так что динамика плазмы определяется в основном силами Ампера. Проведенные расчеты показали, что абсолютные значения сил Ампера возрастают по мере удаления от X линии вдоль поверхности слоя, достигая максимальных величин на значительных расстояниях от середины слоя (рис.6). Распределения сил Ампера вдоль поверхности слоя, усредненные по толщине слоя, были получены для различных режимов формирования токовых слоев, в том числе для различных ионов плазмы (от гелия до криптона), различных градиентов поперечного магнитного поля, полного тока плазмы и т.п.

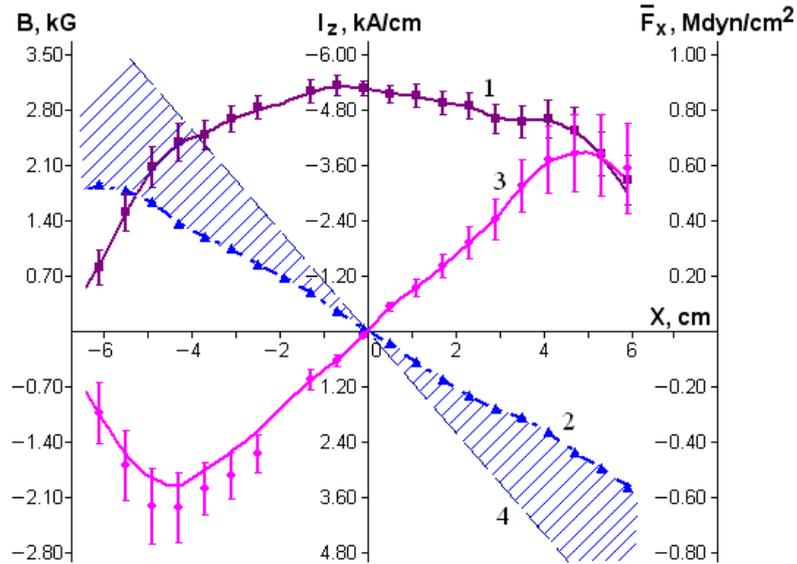


Рис.6. Суммарный ток $I_z(x)$, в области $|y| \leq \Delta y = 1.2$ см – (1); нормальная компонента магнитного поля $B_y^J(x)$ – (2); силы Ампера $F_x(x)$ в области $|y| \leq \Delta y = 1.2$ см – (3); зависимость $-B_y^J(x) = -hx$ – (4). Заштрихованные области соответствуют абсолютной величине нормальной компоненты суммарного магнитного поля $|B_y^T| = |B_y^0 + B_y^J|$.
Условия эксперимента: Ar, $p = 28$ мТорр; $h = 0.63$ кГс/см, $J_z^{\max} = 96$ кА; $t = 1.9$ мкс.

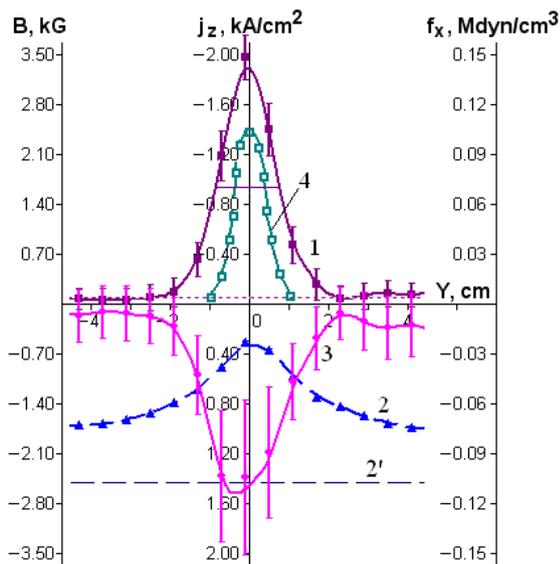


Рис.7. Плотность тока $j_z(y)$ – (1); нормальная компонента слоя $B_y^T(y)$ – (2) и исходного поля B_y^0 – (2'); плотность сил Ампера $f_x(y)$ – (3); плотности плазмы Ne(y) – (4), $x = -5$ см.
Условия эксперимента: Ne, $p = 320$ мТорр; $h = 0.5$ кГс/см; $J_z^{\max} = 70$ кА; $t = 2.3$ мкс.

Изучение пространственных распределений сил Ампера в зависимости от координаты вдоль нормали к поверхности слоя позволило выявить ряд нетривиальных особенностей. Оказалось, что «полутолщины» распределений сил Ампера заметно превышают соответствующие полутолщины распределений плотности тока и, в особенности, концентрации электронов (рис.7). Последние демонстрируют значительно более резкий спад по мере удаления в обе стороны от средней плоскости слоя. Эти различия весьма важны с точки зрения интерпретации обнаруженных особенностей ускорения плазмы в токовых слоях, см. ниже.

5.1.3. Параметры плазмы в токовых слоях (концентрация электронов в различных пространственных областях слоя, температура ионов, энергия направленных движений плазмы) исследовались методами спектроскопии. Для выделения направленных скоростей ионов на фоне тепловых скоростей использовалась схема двухканальных спектральных измерений (рис.1). В результате было установлено, что в слое происходит эволюционный рост температуры ионов, которая в несколько раз превышает температуру электронов. Обнаружено, что во многих случаях возникают сверхтепловые потоки плазмы, которые движутся вдоль поверхности (вдоль ширины) токового слоя. Проведено сопоставление энергий плазменных потоков, зарегистрированных в различных условиях, с работой сил Ампера на расстоянии порядка полуширины токового слоя. О генерации в токовых слоях достаточно энергичных плазменных потоков свидетельствует также обнаружение у боковых концов слоя токов обратного направления относительно токов в центральной (большой) части слоя, см. выше.

Оказалось, что характеристики направленных потоков плазмы существенно различаются в зависимости от рода рабочего газа (аргон, гелий), в котором происходит формирование токового слоя. При развитии слоя в аргоне температура ионов со временем увеличивается: от 20 эВ до 45 эВ, а средняя энергия направленного движения плазмы вдоль поверхности слоя возрастает быстрее и достигает 85 эВ. Данные о величинах и структуре электродинамических сил свидетельствуют о том, что плазма с концентрацией ионов $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, соответствующей концентрации в средней плоскости слоя, действительно может приобретать энергию порядка 100 эВ. Полученные оценки согласуются как с измеренными энергиями ионов аргона, так и с характерным временем их ускорения. При этом было установлено, что направленная вдоль X линии продольная компонента магнитного поля напряженностью до 3 кГс практически не влияет на процесс ускорения ионов аргона.

5.1.4. При развитии токовых слоев в гелии измерения базировались на регистрации двух спектральных линий водородоподобных ионов гелия: He II 320.2 nm и He II 468.6 nm (рис.8), и сравнительного анализа профилей этих линий. Уширения обеих линий обусловлены как эффектом Доплера, так и эффектом Штарка, однако, соответствующие константы уширения этих линий различаются между собой, что позволило определить и скорости движения ионов, и концентрацию электронов в слое.

Направленные потоки плазмы с максимальными энергиями, которые достигали, в зависимости от условий, от 400 эВ до 1300 эВ, были обнаружены при развитии токовых слоев в гелии, в 2D магнитных конфигурациях с нулевой линией, а энергии направленного движения значительно превышали тепловую энергию ионов гелия (50 – 70) эВ (рис.9). На основе проведенного анализа было показано, что ни силы Ампера, ни градиент давления не могут обеспечить ускорения всей плазмы, сосредоточенной в слое, до столь высоких энергий. Указанное противоречие удастся разрешить, если предположить, базирываясь на распределениях сил Ампера и концентрации электронов вдоль нормали к поверхности слоя (рис.7), что ускорение плазмы вдоль поверхности слоя становится пространственно неоднородным. Наиболее эффективное ускорение должно, по-видимому, реализоваться на некотором расстоянии от средней плоскости слоя, в тех областях, где силы Ампера ещё

достаточно велики, а концентрация плазмы уже сравнительно мала, тогда как более плотная плазма в окрестности средней плоскости слоя ускоряется до меньших энергий. В результате движения плазмы вдоль поверхности слоя могут приобретать характер сдвиговых течений.

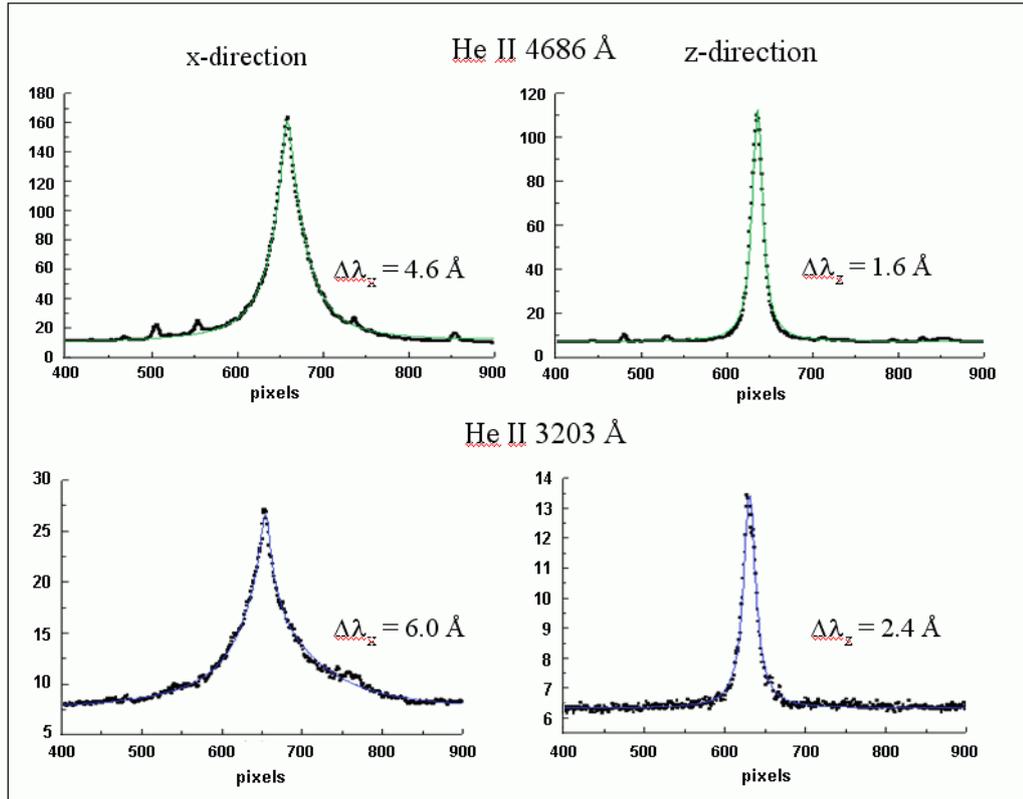


Рис.8. Профили спектральных линий He II 468.6 нм и He II 320.3 нм, которые излучались плазмой токового слоя в x- и z-направлениях и регистрировались камерой Nanogate-1UF. По оси абсцисс – шкала камеры Nanogate (pixels, 100 pixels = 12 Å), по оси ординат – интенсивность излучения плазмы в произвольных единицах. Условия эксперимента: $h = 0.5 \text{ кГс/см}$, $B_z^0 = 0$, He, 320 мТорр; $J_z^{\text{max}} = 70 \text{ кА}$; $t = (4.3 \pm 0.4) \text{ мкс}$.

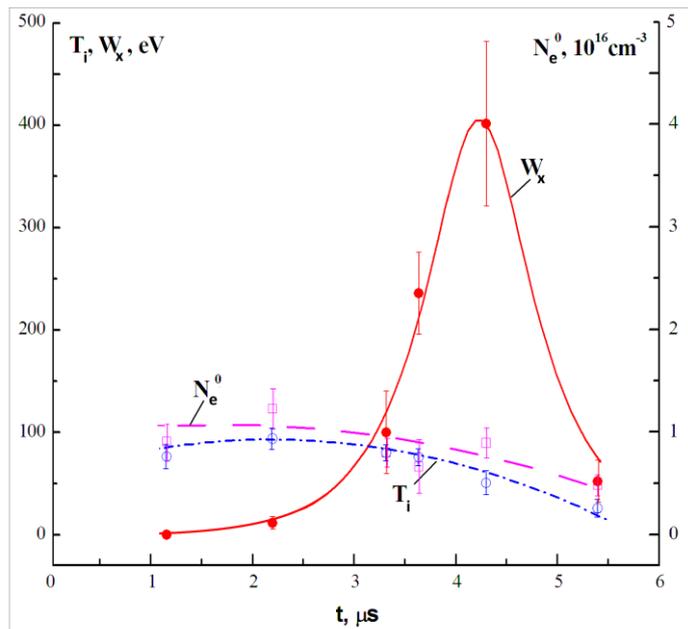


Рис.9. Концентрация электронов N_e и температура ионов T_i в центральной области токового слоя и энергия движения плазмы в x-направлении W_x в зависимости от времени. Условия, см. подпись к рис.8.

Ещё один эффект, обнаруженный в токовых слоях, развивающихся в гелии, состоит в быстром увеличении у боковых краев слоя концентрации электронов, которая в (3-10) раз может превосходить концентрацию электронов в центральной области слоя. Существенно, что значительное увеличение концентрации наблюдается тогда и только тогда, когда возникают сверхтепловые потоки ионов, ускоренные вдоль поверхности слоя, от середины к боковым краям. Естественно связать рост концентрации электронов на периферии слоя с процессами взаимодействия плазменных потоков со стенками вакуумной камеры. Вместе с тем, этот эффект представляет собой дополнительное подтверждение генерации потоков плазмы в токовых слоях.

В отличие от слоя, образованного в аргоне, в токовом слое, сформированном в гелии в 3D магнитной конфигурации, т.е. в присутствии продольной компоненты магнитного поля напряженностью 3 кГс, не наблюдается ни ускоренных потоков плазмы, ни увеличения концентрации электронов у боковых краев слоя. Отсюда также следует вывод, что ускоренные ионы, обладающие максимальной энергией, имеют меньшую концентрацию по сравнению с концентрацией в средней плоскости слоя, что подтверждает предложенную гипотезу о сдвиговом характере движений плазмы в токовых слоях.

5.2. Электрические поля, возбуждаемые при релаксации электронного пучка в плазме

Эксперименты проводились со столбом плазмы, создаваемой плазменно-пучковым разрядом в аргоне при давлении 10^{-4} Торр в продольном магнитном поле, создаваемым системой катушек. Пробный электронный пучок длительностью 5 мксек с энергией $W_b = (mv_b^2)/2 = 50-5000$ эВ ($W_b/T_0 = 10-1000$), и током 0.1-10 А ($n_b / n_0 = 10^{-5}-10^{-2}$) инжектировался в распадающуюся плазму.

Для создания размытого по продольным скоростям распределения электронов пучка ток в первой от катода катушки был включен в противоположном по отношению к остальным катушкам направлении, создавая в районе катода область с нулевым магнитным полем. В результате удалось создать пучок с начальным размытием по продольным скоростям $\Delta v_b / v_b = (1/2) \Delta W_b / W_b \approx 0.2$

Инжекция пучка в плазму сопровождалась нагревом электронов плазмы и соответствующим ростом зондового тока, как показано на Рис.1б. Зависимость температуры электронов от времени приведена на Рис. 1с. Измерения проводились спустя 1,5-2 мкс после начала инжекции второго пучка, когда параметры плазмы достигали стационарных значений.

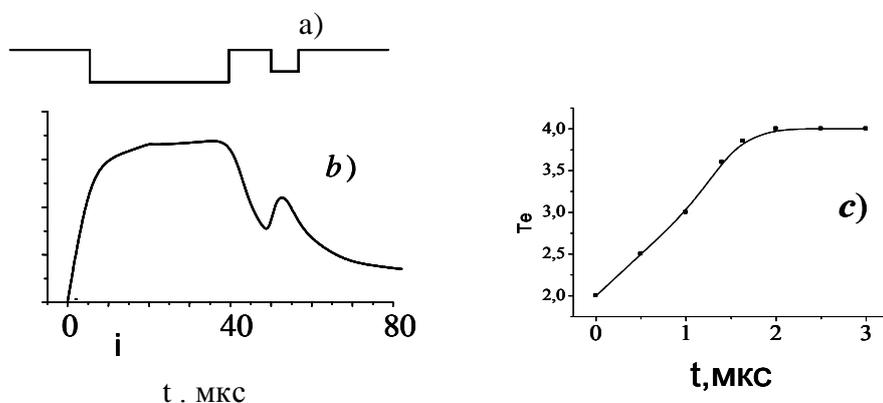


Рис.1. а)- осциллограмма тока пучка; б)-зависимость зондового тока и с) – зависимость температуры электронов от времени.

Так как рост зондового тока определяется ростом температуры плазмы, он может быть использован для измерений электрических полей в плазме, возбуждаемых при пучково-плазменном взаимодействии.

Увеличение температуры электронов плазмы может быть обусловлено как передачей энергии от электронов пучка при парных электрон-электронных столкновениях, так и в результате нагрева электронов в электрических полях, возбуждаемых при релаксации пучка в плазме.

Нагрев электронов плазмы при кулоновских столкновениях с электронами пучка $d(n_0T)/dt = W_b v_c n_0 n_b$ при $W_b \sim 1000$ эВ приводит к росту T_e на $\sim 10^{-2}$ эВ за время $\sim 10^{-5}$ с, что пренебрежимо мало по сравнению с наблюдаемой скоростью роста температуры.

Нагрев электронов плазмы в поле плазменных волн описывается уравнением $dT_e/dt = \epsilon v_m$, где $\epsilon = e^2 E_0^2 / 2m\omega^2$, E_0 и ω – напряженность и частота поля, v_m – частота электрон-нейтральных столкновений. Таким образом, напряженность плазменного поля определяется выражением $E_0^2 = (T - T_0)(2m\omega^2/e^2)(1/v_m)$. Приведенные на Рис.2 результаты измерений распределения плазменного поля по длине столба демонстрируют изменение характера релаксации пучка. Пучок с энергией 500 эВ отдает практически всю энергию вблизи катода, релаксируя к плато на функции распределения, в то время, как более энергичный пучок сохраняет энергию (и вид функции распределения) на всей длине взаимодействия.

На Рис.2В представлена зависимость плотности энергии плазменных колебаний от первоначальной энергии электронов пучка, измеренная на расстоянии 50 см от катода. Энергия поля достигает величины $W_L/n_0T_0 \sim 0,1-0,2$, близкой к ранее определенной из потерь энергии электронов пучка. Рост энергии поля прекращается при достижении порога перехода режима релаксации пучка от квазилинейного к турбулентному.

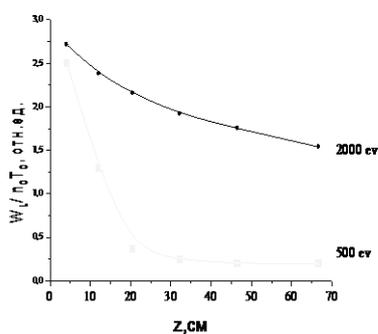


Рис.2. Распределение энергии плазменных волн по длине

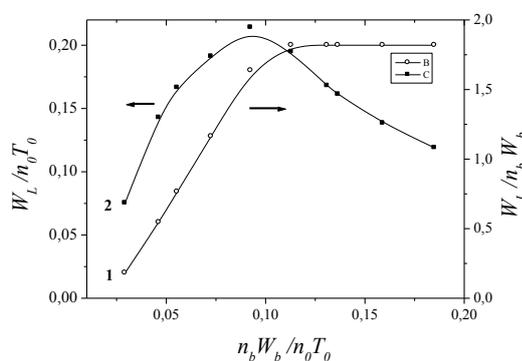


Рис.3. 1-Зависимость энергии волн от энергии пучка; 2- отношение энергии волн к энергии от пучка

При достижении порога происходит уменьшение эффективности передачи энергии от пучка плазменным волнам, как это видно из Рис. 2С, где приведено отношение плотности энергии плазменных волн к начальной плотности энергии пучка. Относительная доля энергии, переданная волнам возрастает, достигая максимума $W_L/n_bW_b \approx 2$. Плотность энергии волн превышает плотность энергии пучка в связи с тем, что энергия поставляется пучком со скоростью v_b , а выносится с групповой скоростью плазменных волн $v_g \sim v_b (T/W_b)$.

В предыдущих отчетах механизм генерации радиоизлучения, а также и механизм ограничения энергии плазменных волн были связаны с развитием распаднoй неустойчивости и захватом плазмонов в возникающие под действием пондеромоторной силы ямы плотности с последующим коллапсом. На основе приведенных в настоящем отчете результатов порог распаднoй неустойчивости и близкий к нему порог коллапса

составляет $W_L/n_0T_0 \sim 10^{-1}$, что существенно превышает теоретические значения как для монохроматических волн, так и аналитические результаты для волн с широким спектром, $W_L/n_0T_0 \sim 10^{-3}$ при $\Delta v_b/v_b \approx 0.2$

Дополнительное возрастание порога может быть объяснено рефракцией ленгмюровских волн на поперечном градиенте плотности плазмы, вносящей затухание с декрементом $\nu_r \sim (\Delta n_0/n_0)(v_g/2L)$, где $L \sim 2$ см – характерный размер неоднородности плазмы в радиальном направлении.

А.Г. Франк, С.Н. Сатунин. Эволюция структуры электрических токов и электродинамических сил в токовых слоях // Физика плазмы 2011. Т. 37(10), С. 889-908.

A.G. Frank, N.P. Kyrie, S.N. Satunin Plasma dynamics in laboratory-produced current sheets // Physics of Plasmas 2011. Vol. 18(11), P. 111209(1-9).

Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк. Генерация сверхтепловых потоков плазмы в токовых слоях // Письма в ЖЭТФ, 2012. Т.141(1).

Г.В.Островская, А.Г.Франк. Особенности эволюции и структуры плазмы токовых слоев, формируемых в двумерных магнитных полях с нулевой линией в условиях низкой начальной ионизации газа, и их интерпретация // Журнал Технической Физики 2012. Т. 82(4). С.75-85.

К.Ф.Сергейчев, Д.М. Карфидов. Распространение поверхностной СВЧ-волны по плазменному столбу послесвечения импульсного разряда // [Физика плазмы](#) 37, 9, 2011, с.787

Отв.: А.Г.Франк, д.ф.м.н., гл.н.с. ИОФ РАН

5.3. Моделирование динамики волн в магнитосфере и ионосфере (ИПФ)

На крупномасштабном стенде «Крот» (ИПФ РАН) в слабостолкновительной замагниченной плазме исследована генерация квазистационарного магнитного поля (КМП) накачкой свистового диапазона частот. Источниками КМП являются нелинейные токи, возбуждаемые за счет продольной и поперечной компонент усредненной пондеромоторной силы, действующей на заряженные частицы в пространственно локализованном высокочастотном поле накачки. Установлено наличие двух составляющих КМП – «медленной», обусловленной возмущениями плотности плазмы, и «быстрой», связанной с поперечными дрейфовыми токами, охватывающими область, занятую полем накачки, по азимуту. Обнаружено, что время установления КМП определяется временем включения поля накачки, а перенос импульсных токов и магнитных полей из области их генерации происходит со скоростью низкочастотных свистовых волн.

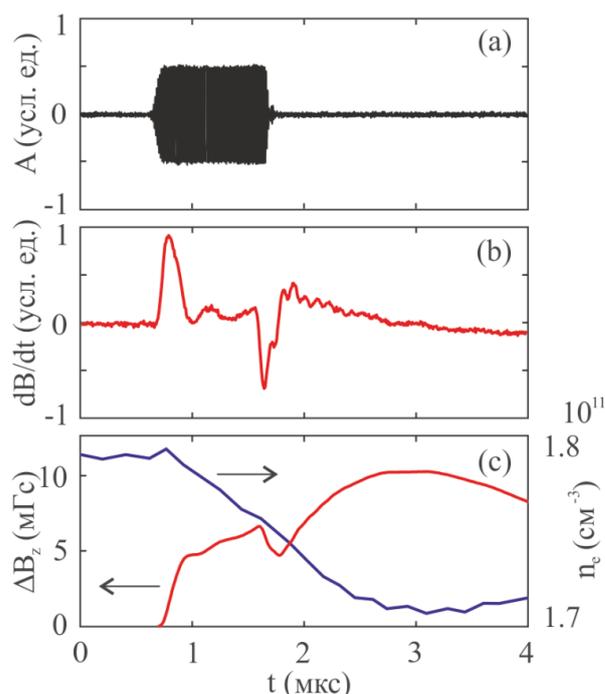


Рис. 6 (а) Осциллограмма импульса ВЧ накачки свистового диапазона; (b) неинтегрированный сигнал с магнитного зонда; (с) зависимость аксиальной компоненты магнитного поля от времени; одновременно регистрируемое возмущение концентрации плазмы

Айдакина Н.А., Гушин М.Е., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Квазистационарное магнитное поле, возбуждаемое радиоимпульсом свистового диапазона частот // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т.93, №9. С.555-560

Колданов В.А., Коробков С.В., Гушин М.Е., Костров А.В. Численное моделирование электромагнитных полей, возбуждаемых рамочными антеннами в плазме в свистовом диапазоне частот // Физика плазмы 2011. Т.37, №8. С.729-738.

Впервые проведены исследования функции распределения электронов на начальном этапе развития ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке, используемой для моделирования циклотронной неустойчивости в магнитосферах Земли и планет. Анализ показал, что функция распределения слабо спадает с ростом энергии в диапазоне 70-400 кэВ, затем темп спада возрастает и функция распределения обрывается на величине 500-600 кэВ. Эти результаты будут использованы для объяснения параметров плазмы, получаемой на поздних стадиях разряда, и анализа их влияния на характеристики нелинейных режимов циклотронной неустойчивости.

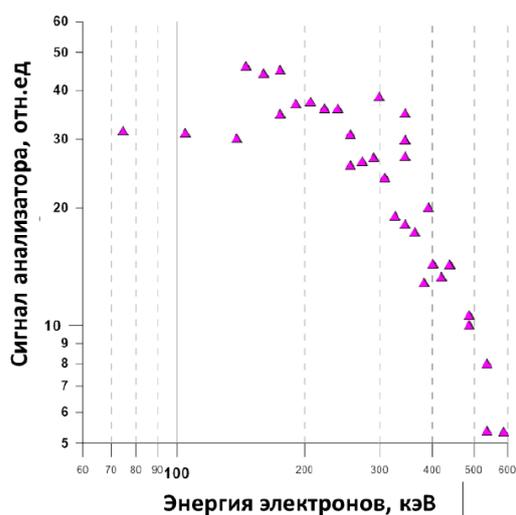


Рис. 7: Результаты измерения энергии электронов, вылетающих из ловушки перед началом основного разряда, полученные с помощью магнитостатического анализатора

Golubev S.V., Izotov I.V., Mansfeld D.A., Semenov V.E. Experimental EEDF investigation at initial stage of ECR discharge // Rev. Sci. Instrum. Feb. 2012 (in press).

5.4. Лабораторное моделирование продольных токов планетных магнитосфер (ИЛФ СО РАН)

5.4.1. Схема эксперимента

Опыты проводились на стенде КИ-1, включающим вакуумную камеру длиной 5 м и диаметром 1.2 м с рабочим давлением 10^{-6} Торр. Поток водородной плазмы создавался импульсным индукционным генератором посредством нагрева и ионизации газа. Напуск газа осуществлялся импульсным клапаном. Для уменьшения расширения потока в промежутке длиной 3 м между тета-пинчем и областью взаимодействия вдоль вакуумной камеры прикладывалось направляющее магнитное поле величиной $B_x = (5-20) \cdot 10^{-4}$ Т. В области взаимодействия плазменный столб имел диаметр ≈ 0.6 м и длительность обтекания до 50 мкс. Применявшийся магнитный диполь имел момент до $5 \cdot 10^2$ А·м² и конструктивно размещался внутри сферической диэлектрической оболочки диаметром 0.082 м. Параметры плазменного потока измерялись зондами Ленгмюра. Первый располагался на расстоянии $X=1.4$ м вверх по течению, а второй вблизи диполя на регулируемых расстояниях 0.05-0.25 м. Опорный электрод регистрировал электрический потенциал в плазме. Конструктивно зонд Ленгмюра был совмещен с трех-компонентным магнитным зондом для регистрации магнитных возмущений. Пространственное разрешение измерений составляло не менее $5 \cdot 10^{-3}$ м.

концентрация (H^+)	$n_i = (0.5-5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$	число Маха	$M_S \approx 2.5$
скорость	$V_o = 40-110 \text{ км/с}$	Число Альвена-Маха	$M_A \approx 2.5-7$
момент	$\mu = (1-5) \cdot 10^2 \text{ А} \cdot \text{м}^2$	число Рейнольдса	$R_{me} \sim 20-70$
радиус диполя	$R_D = 0.04 \text{ м}$	число Кнудсена	$\lambda_{ii}/R_M > 5$
температура	$T_e = 5-15 \text{ эВ}$	замагниченность ионов	$R_{Li}/R_M \approx 0.5-0.25$
размер магнитосферы	$R_M = 0.1-0.15 \text{ м}$	степень ионизации	$\alpha > 90\%$

Таблица 1. Размерные и безразмерные параметры эксперимента

В таблице приведены некоторые размерные и безразмерные параметры опытов. Отметим, что по отношению размера магнитосферы к радиусу диполя настоящий эксперимент занимает промежуточное положение между Землей и Меркурием. Для последнего проблема продольных токов и трансполярного потенциала сформулирована как одна из важнейших в будущих исследованиях магнитосферы этой планеты [22]. Типичная ширина пограничного слоя в экспериментах сопоставима с ионным гирорадиусом или несколько больше. Оценка трансполярного потенциала в этом случае дает $eU \sim eVB/c \cdot R_L \sim MV^2$, т.е. величину порядка кинетической энергии ионов в набегающем потоке.

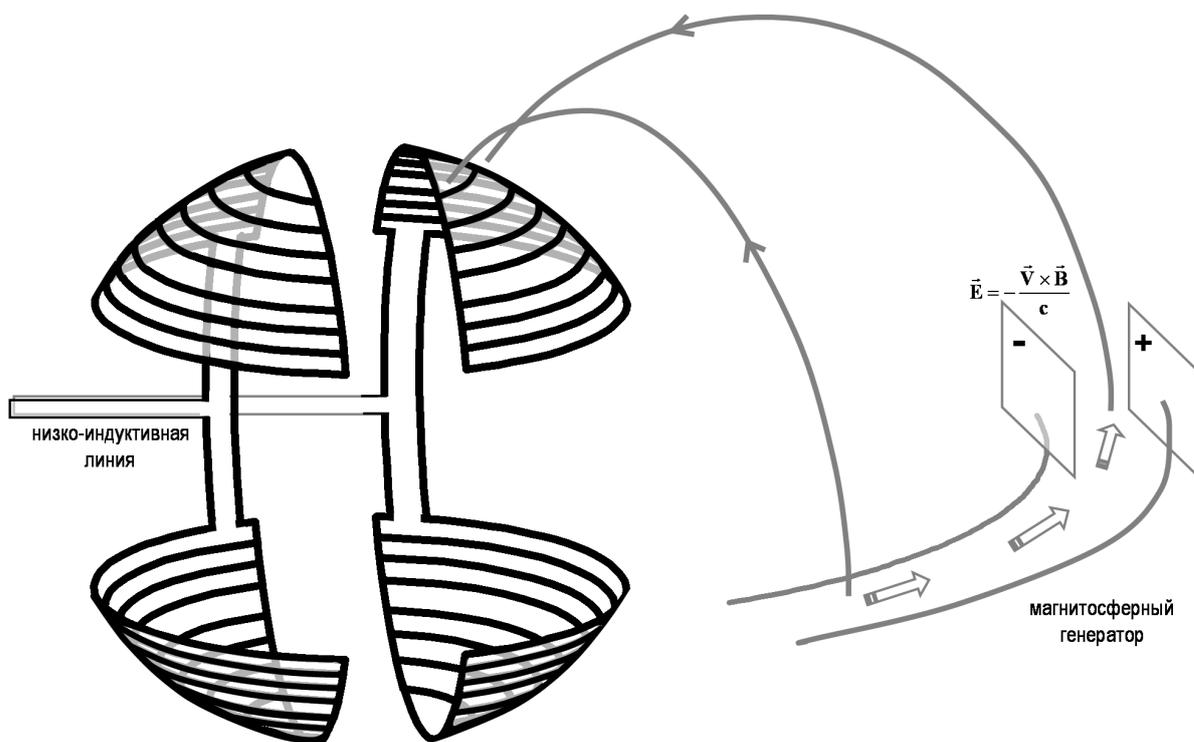


Рис. 2. Схема расположения пластин на корпусе диполя для измерения потенциала на утренней и вечерней стороне. На вечерней стороне также показана схема магнитосферного генератора.

Для измерения трансполярного потенциала на поверхность диполя накладывались четыре тонкие медные пластины в форме сегментов сферы, как это показано на рис. 2. Между парами пластин на полюсах диполя имелся зазор $\Delta Y = 7 \cdot 10^{-3}$ м. На каждом полюсе пластины покрывали диполь до широты примерно 45° . Утренняя и вечерняя пара шунтировались между собой и подсоединялись к двухпроводной ленточной линии с низкой индуктивностью ($0.3 \cdot 10^{-7}$ Гн), емкостью ($1.4 \cdot 10^{-9}$ Ф) и омическим сопротивлением (< 0.01 Ом). Напряжение на утренней и вечерней стороне диполя измерялось в режиме несогласованной линии относительно заземленной стальной оболочки вакуумной камеры и независимо друг от друга. При длине 1 м время прохождения волны составляло примерно 10 нс при характерной длительности процессов 3 мкс.

Необходимо отметить, что лабораторный эксперимент имеет ряд отличий от реальной магнитосферы. Во первых, не смотря на сверхзвуковой и сверх-альвеновский характер течения ударная волна в описываемых экспериментах не наблюдалась. Насколько известно авторам, она не наблюдалась и в других экспериментах с Терреллой. Четко выраженный переходной слой со значительным повышением концентрации описывается в экспериментах с двумерным диполем [23], однако данные по нагреву ионов отсутствуют.

Специальные измерения авторов показали, что в области перед магнитопаузой имеется слой повышенной концентрации и наблюдаются отраженные ионы с потоком примерно равным исходному. Мы полагаем, что для образования бесстолкновительной ударной волны требуется длительное время на развитие различных пучковых неустойчивостей, приводящих к термализации ионов и электронов, технически трудно реализуемое. Не смотря на отсутствие ударной волны, магнитосфера, ограниченная магнитопаузой на которой магнитное давление уравнивает давление плазмы, в лабораторных экспериментах формируется и качественно моделирует определенные свойства планетарных магнитосфер. Другой недостаток, который ограничивает возможности настоящего эксперимента, состоит в отсутствии вмороженного магнитного поля. Для создания адекватного аналога ММП в лаборатории необходимо вмораживать соответствующее поле в источнике на стадии ионизации и нагрева плазмы. При дальнейшем выносе вместе с потоком поле значительно и неконтролируемым образом искажается, если размер источника меньше размера камеры. По этой причине создание однородного потока с вмороженным полем является технически сложной задачей. Не смотря на отсутствие ММП в экспериментах, изучение процессов генерации электрических полей за счет конечной ширины пограничного слоя представляет самостоятельный интерес. С точки зрения безразмерных параметров подобия, основным ограничением лабораторной Терреллы является относительно большой размер ионной плазменной длины и гирорадиуса (рассчитанного по полю диполя в подсолнечной точке). Ряд численных расчетов кинетическими кодами показал, что структура обтекания с четко выраженной плазменной полостью качественно подобная планетарным магнитосферам образуется уже при отношении $R_{Li}/R_M < 1$, и что переход к существенно иному режиму взаимодействия, в котором доминируют кинетические и двухжидкостные процессы, имеет резкий характер [24]. Отметим, что описываемые эксперименты удовлетворяли условию $R_{Li}/R_M < 1$.

5.4.2. Результаты измерений

Значение потенциала пластин относительно оболочки камеры определяется потенциалом плазмы контактирующей с ними и процессами зарядки потоками частиц. Другой фактор связан с возникновением общего скачка потенциала между плазмой и камерой. Это значительно усложняет интерпретацию самих потенциалов. Однако, указанные процессы в первом приближении действуют одинаково на утренние и вечерние пластины и не влияют на разность потенциалов между ними. На рис. 3 показаны типичные сигналы. На верхней панели представлены динамика плотности плазмы и потенциала пластин в отсутствие дипольного поля. Нулевой момент времени соответствует срабатыванию разряда тета-пинча. Без дипольного поля потенциалы утренней и вечерней пары пластин совпадали с точностью более 1%, что говорит о высокой степени симметрии плазменного потока. В этом случае потенциал в основном определяется температурой электронов. Величина зарегистрированного потенциала 40-50 В примерно соответствует $T_e \approx 15$ эВ. Сигнал напряжения на ранних временах (начиная с 5 мкс) объясняется тем, что тета-пинч генерирует предвестник из быстрой и очень разреженной плазмы, которая достигает диполь гораздо раньше, чем основной поток (25 мкс). В поле диполя потенциалы пластин существенно различаются. Очевидно, что дипольное поле блокирует прямые потоки электронов на пластины и участок отрицательного потенциала на ранних временах отсутствует. Положительный скачок потенциалов в $t \approx 15$ мкс связан с попаданием на пластины ионов быстрой ($V \approx 200$ км/с) и очень разреженной плазмы. С приходом более плотной плазмы начинает формироваться магнитосфера, в результате чего электроны могут попадать на диполь через каспы и заряжать пластины отрицательно. Нас интересует поведение потенциалов во время обтекания диполя основным потоком плазмы, и когда

формируется магнитосфера со сжатием поля $\Delta B_z \approx \sqrt{2\pi p_0}$, соответствующим балансу давлений. Возмущение магнитного поля внутри магнитосферы показано на нижней панели. Максимальная величина сжатия поля 10^{-2} Т наблюдается в момент максимума потока и хорошо соответствует кинетическому давлению примерно равному $p_0 \approx 10^3$ дин/см². Расстояние до лобовой точки оценивается как $R_M = (\mu^2 / 2\pi p_0)^{1/6} \approx 0.11$ м, что почти в 3 раза больше чем радиус диполя. Характерные динамические времена установления магнитосферы R_M / V_A и R_M / V_0 примерно равны 1 мкс, что заметно меньше длительности максимума потока и сжатия поля (полуширина 3-5 мкс).

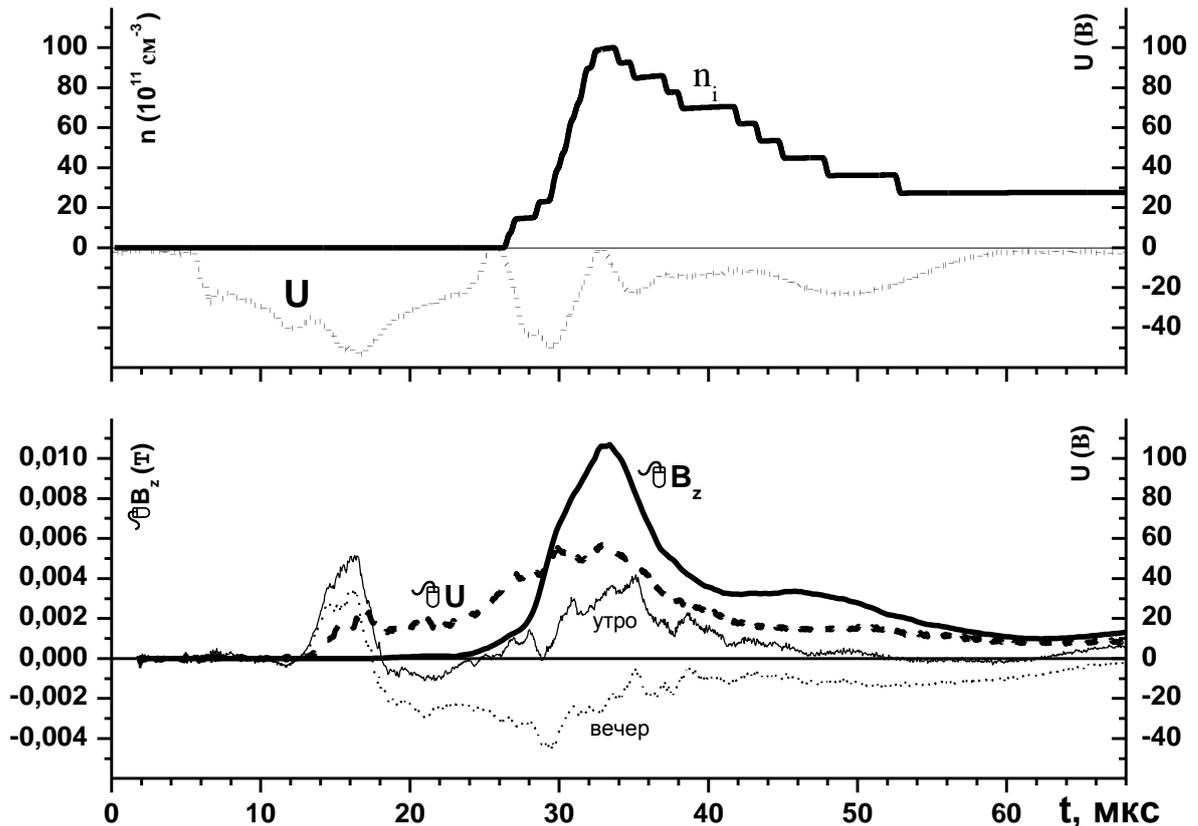


Рисунок 3. Верхняя панель - динамика концентрации плазмы на расстоянии $x=0.09$ м (сплошная) и потенциала пластин (точечная кривая) в отсутствии дипольного поля. Нижняя панель – возмущение магнитного поля (жирная сплошная), напряжение на утренней (тонкая сплошная) и вечерней (тонкая точечная) паре пластин при наличии дипольного поля $\mu=1.25 \cdot 10^2$ А·м². Жирная пунктирная кривая показывает разность потенциалов между парами пластин.

С приходом основного потока плазмы и формированием магнитосферы потенциал вечерних пластин становится отрицательным, а утренних положительным. Разность между ними является основным предметом настоящего исследования и представлена на нижней панели. Максимальное значение достигается примерно в момент максимума потока плазмы и далее спадает. Для измерения зависимости трансполярного потенциала от параметров плазмы менялась задержка между временем открытия газового клапана и разрядом тета-пинча. На рис. 4 показаны измерения образующейся плазмы двумя зондами. Первый зонд располагался на расстоянии 1.4 м от диполя, второй зонд – вблизи диполя на расстоянии 0.09 м. Сравнение сигналов позволяет определить скорость потока. Можно видеть, что с уменьшением задержки скорость увеличивается, а концентрация падает. Отметим, что данные на рис. 3 получены в режиме N5.

При увеличении задержки образующаяся плазма разделяется на две компоненты – относительно быструю и медленную с высокой концентрацией. В режимах N1-N4 это видно на сигналах ближнего зонда как пьедестал и следующий за ним максимум. Анализ показал, что второй медленный поток, достигая диполя, приводит к быстрому разрушению магнитосферы. Возможно, это связано с низкой температурой и проводимостью медленного потока. По этой причине для анализа зависимости потенциалов от параметров брался только первый поток плазмы, указанный для режима N1 стрелкой.

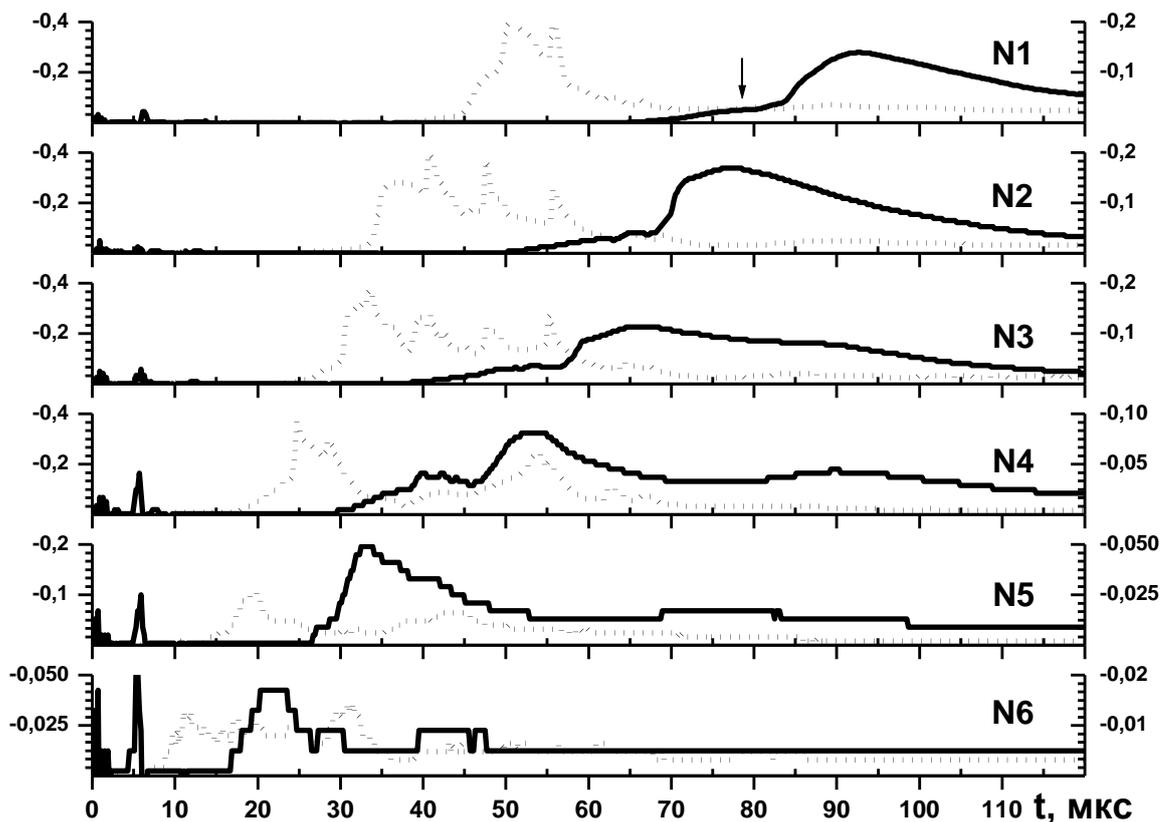


Рисунок 4. Динамика тока ближнего зонда ($x=0.09$ м, сплошная) и дальнего зонда ($x=1.4$ м, точечная кривая) в различных режимах работы тета-пинча. С увеличением номера режима задержка между газовым клапаном и разрядом уменьшается. Единицы измерения условные.

На рис. 5 показаны измерения скорости потока и кинетического давления плазмы $p = MnV^2$ в зависимости от номера режима. С уменьшением времени задержки скорость увеличивается примерно в 3 раза, а концентрация наоборот уменьшается примерно в два раза. Здесь и на следующих графиках сглаженные линии, соединяющие экспериментальные точки приведены для удобства. На следующем рис. 6 показана разность потенциалов, измеренная для двух моментов диполя $\mu=1.25 \cdot 10^2$ и $3.9 \cdot 10^2$ А·м², в зависимости от квадрата скорости потока, выраженного в единицах энергии ионов $MV^2/2$. Как видно $8U$ практически линейно растет с энергией ионов и примерно равно ей по абсолютной величине. Увеличение момента диполя в три раза привело к незначительному повышению потенциала примерно на 30-40%, особенно заметное при малых скоростях. При обоих значениях момента зависимость от скорости имеет подобных характер. Другим экспериментальным фактом было следующее. При обращении

магнитного момента с Южного направление на Северное разность потенциалов меняла знак, при этом на утренней стороне потенциал пластин имел преимущественно отрицательное значение, а на вечерней – положительное.

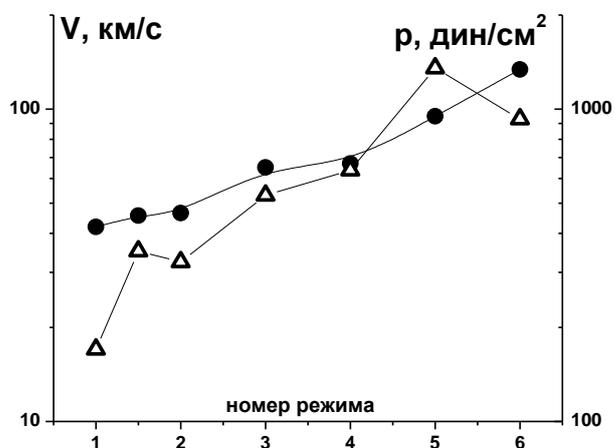


Рисунок 5. Скорость (●) и давление потока плазмы (△) в зависимости от номера режима.

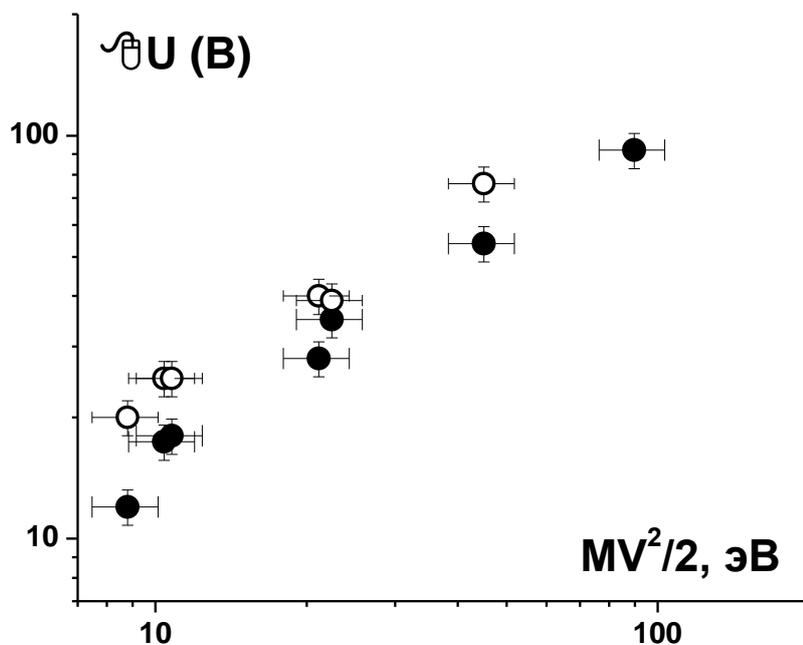


Рисунок 6. Зависимость разности потенциалов между утренней и вечерней стороной диполя от энергии ионов в потоке плазмы для двух магнитных моментов диполя, $1.25 \cdot 10^2$ (○) и $3.9 \cdot 10^2$ А·м² (●).

В отдельной серии опытов были измерены профили электрического потенциала плазмы вдоль линии утро-вечер. Электрический зонд пересекал магнитосферу вдоль оси Y, находясь в экваториальной плоскости $Z=0$ либо впереди диполя ($X=0.04$ м), либо позади него ($X=-0.04$ м). Конкретные параметры этой серии отличались от указанных выше режимов более высокой концентрацией потока $n_i \approx (4-5) \cdot 10^{13}$ см⁻³, однако по скорости $V_0 = 40$ км/с соответствовали режимам N1-N2 с минимальной скоростью. На рис. 7 показаны измерения для двух значений момента диполя $\mu = 1.25 \cdot 10^2$ и $3.9 \cdot 10^2$ А·м² совместно с профилями концентрации плазмы и возмущения магнитного поля. Положение магнитопаузы примерно соответствует пересечению профиля $8B_z$ нулевой линии.

Расчетный размер магнитосферы $R_M = (\mu^2 / 2\pi m_i M V_o^2)^{1/6}$ равен 0.11 и 0.16 м соответственно. Положение магнитопаузы во фронтальном направлении найденное из профилей вдоль оси X (не показаны) равно 0.12 и 0.17 м, а на флангах (рис. 7) 0.15 и 0.19 м соответственно. За пределами магнитопаузы возмущение магнитного поля компенсирует поле диполя, а внутри магнитосферы увеличивает его. В пределах пограничного слоя концентрация плазмы резко уменьшается. Для большего момента диполя плазма внутри магнитосферы практически отсутствует. Электрический потенциал в плазме растет по мере приближения к диполю. Отчетливо заметна его асимметрия. На утренней стороне ($Y < 0$) он систематически выше, чем на вечерней ($Y > 0$), особенно вблизи переходного слоя. Точечной линией показана симметричная кривая, полученная сглаживанием и усреднением потенциала на утренней и вечерней стороне $\langle U(y) + U(-y) \rangle / 2$. Данная кривая иллюстрирует явным образом, что на фоне общего симметричного распределения потенциал имеет положительную добавку на утренней стороне и отрицательный вклад на вечерней. При этом разница максимальным образом проявляется вблизи внутреннего края переходного слоя. Отчетливо видно, что около магнитопаузы электрическое поле направлено к диполю и на утренней и на вечерней стороне. По пространственному расположению и направлению электрического поля полученные данные полностью соответствует модели генератора на рис. 1. Максимальное значение величины $U(y) - U(-y)$, которая характеризует разность потенциалов утро-вечер, примерно равно 20 и 30 В (в зависимости от момента). Это хорошо согласуется с измерением трансполярного потенциала на полюсах диполя для режимов N1-N2 с соответствующей скоростью.

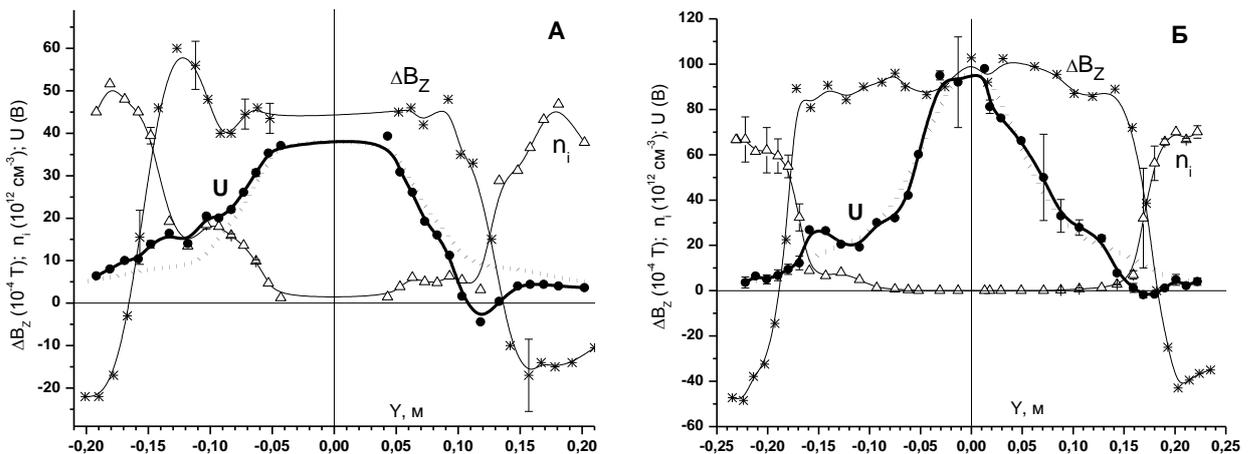


Рисунок 7. Профили электрического потенциала в плазме (•), концентрации (Δ) и возмущения магнитного поля (*) вдоль линии утро-вечер в экваториальной плоскости $Z=0$.
А – момент диполя $\mu=1.25 \cdot 10^2$, $X=-0.04$ м. **Б** – момент диполя $\mu=3.9 \cdot 10^2$ А·м², $X=0.04$ м.

В отличие от пластин, расположенных на полюсах диполя и контактирующих с плазмой, зонд при расположении глубоко внутри магнитосферы в области, где концентрация плазмы очень мала, регистрирует относительно большие потенциалы. Так, на рис. 7-Б величина потенциала на расстояниях ≤ 0.05 м от центра диполя в несколько раз превышает кинетическую энергию ионов потока. Из графика также видно, что в отличие от переходного слоя потенциал внутри магнитосферы имеет относительно симметричное распределение. Если среднее значение величины $U(y) - U(-y)$ в интервале переходного слоя $0.2 \leq |y| \leq 0.13$ примерно равно 12 В, то в области внутри магнитосферы $0.13 \leq |y| < 0$ всего 2.5 В. Это означает, что область больших потенциалов плазмы вблизи диполя при

проектировании вдоль силовых линий на полюса не может дать заметного вклада в трансполярный потенциал.

I F Shaikhislamov *et al* 2011 [Laboratory experiment on region-1 field-aligned current and its origin in the low-latitude boundary layer](#) *Plasma Phys. Control. Fusion* 53 035017

I. F. Shaikhislamov, Yu. P. Zakharov, V. G. Posukh, E. L. Boyarintsev, A. V. Melekhov, V. M. Antonov and A. G. Ponomarenko 2010 Region-1 field aligned currents in experiments on laser-produced plasma interacting with magnetic dipole. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 6, 2011, pp 40-43 doi:10.1017/S1743921311006545

I. F. Shaikhislamov, V. M. Antonov, Yu. P. Zakharov, E. L. Boyarinsev, V. G. Posukh, A. V. Melekhov and A. G. Ponomarenko 2011 Investigation of Region-1 field aligned current of planetary magnetospheres in laboratory experiments *EPSC Abstracts* Vol. 6, EPSC-DPS2011-78-1 (2 pages)

Отв.: Шайхисламов И.Ф.

6. Применение методов нелинейной физики для исследования физических явлений в гелиосфере

6.1. Метастабильные токовые слои в бесстолкновительной плазме: изучение равновесий, неустойчивостей и процессов ускорения частиц (ИКИ)

6.1.1. Кинетические модели токовых слоев с широм магнитного поля

Многочисленные спутниковые измерения указывают на то, что в хвосте магнитосферы Земли могут формироваться тонкие токовые слои (толщиной порядка одного или нескольких ларморовских радиусов ионов), в которых нормальная компонента магнитного поля (B_z) практически постоянна, а другие его компоненты (тангенциальная B_x и сдвиговая B_y) зависят от поперечной координаты (z). Плотность тока в таком слое также имеет две самосогласованные компоненты (j_x и j_y , соответственно), а силовые линии магнитного поля деформированы, и не лежат в одной плоскости. Для исследования таких фактически одномерных равновесных токовых конфигураций были использованы две кинетические модели - численная, основанная на методе крупных частиц, и аналитическая. Результаты расчетов показывают, что для одних и тех же входных данных могут существовать две различные моды самосогласованного сдвигового магнитного поля B_y , и соответственно, две конфигурации тонкого токового слоя. Для антисимметричной (относительно z -координаты) моды B_y магнитные силовые линии закручены внутри слоя, однако профили плотности плазмы, компоненты j_y плотности тока и компоненты B_x магнитного поля практически мало отличаются от случая с магнитным полем без сдвига ($B_y=0$). Для симметричной B_y моды магнитные силовые линии лежат на изогнутой поверхности, при этом плотность плазмы в слое мало изменяется, а толщина токового слоя становится вдвое больше. Анализ зависимости структуры токового слоя от потоковой анизотропии демонстрирует существенное утоньшение слоя при уменьшении отношения тепловой и дрейфовой скоростей плазмы, что обусловлено динамикой квазиadiaбатических ионов. Показано, что результаты аналитической и численной моделей хорошо согласуются друг с другом. Обсуждаются вопросы применения данной модели к описанию токовых слоев на магнитопаузе и вблизи областей пересоединения.

Мингалев О.В., И.В. Мингалев, М.Н. Мельник, А.В. Артемьев, Х.В. Малова, В.Ю. Попов, Шен Чао, Л.М. Зелёный, Кинетические модели токовых слоев с широм магнитного поля, *Физика Плазмы*, принято к печати, 2011.

6.1.2. Изгибная неустойчивость цилиндрического токового слоя.

Работа посвящена исследованию изгибной неустойчивости одномерного цилиндрического токового слоя. В качестве начального равновесия выбрана модель самосогласованного θ -пинча с постоянными дрейфовыми частотами ионов и электронов. Показано, что в данной равновесной конфигурации может развиваться изгибная неустойчивость; получены зависимости инкрементов и действительных частей частоты неустойчивости от номера моды. Найденные зависимости показывают, что длина волны неустойчивой моды с наибольшим инкрементом растёт пропорционально толщине токового слоя, а значение инкремента при этом уменьшается. Неустойчивые моды развиваются лишь в узком диапазоне значений длин волн, определяемом относительной толщиной токового слоя. С ростом радиуса цилиндрического токового слоя растут инкремент неустойчивости и номер неустойчивой моды. В работе обсуждается возможность применения полученных результатов для описания динамики токовых слоёв в магнитосферах Урана и Нептуна.

Попоудин С.Ю., А.В. Артемьев, Х.В. Малова, Изгибная неустойчивость цилиндрического токового слоя, Космические исследования, принято к печати, 2011.

6.1.3. Кинетическая модель двумерного цилиндрического токового слоя

Работа посвящена построению класса стационарных решений системы уравнений Власова-Максвелла в виде двумерных цилиндрических токовых слоёв с током вдоль азимутального направления $\mathbf{j} = j_\theta(\rho, z)\mathbf{e}_\theta$. Магнитное поле такой системы обладает двумя компонентами $\mathbf{B} = Bz(\rho, z)\mathbf{e}_z + B\rho(\rho, z)\mathbf{e}_\rho$. Математически задача сводится к нахождению решений нелинейного уравнения в частных производных для функции

$$u(\rho, z): \partial^2 u / \partial x^2 + x^{-1} \partial^2 u / \partial z^2 = e^{-u}, \text{ где } x = \rho^2.$$

Методами теории групп найдено трехпараметрическое семейство точных решений этого уравнения и рассмотрены асимптотики решений при больших значениях ρ и вблизи оси цилиндрической системы координат ($\rho \sim 0$). Обсуждается применение построенного класса решений для описания токовых слоёв, наблюдаемых в магнитосферах планет солнечной системы, магнитные диполи которых лежат в плоскости эклиптики.

Васько И.Ю., Попов В.Ю., Кинетическая модель двумерного цилиндрического токового слоя, Вестник МГУ, принято к печати.

6.1.4. Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц

Обзор посвящён плазменным структурам с предельно малым поперечным масштабом – тонким токовым слоям, открытым и исследованным в процессе спутниковых наблюдений, проводившихся в хвосте магнитосферы Земли в последние десятилетия. Образование тонких слоёв связано с проявлением сложных динамических процессов, развивающихся в бесстолкновительной космической плазме во время геомагнитных возмущений и вблизи областей пересоединения. В статье приведен обзор моделей, описывающих тонкие токовые структуры в хвосте магнитосферы Земли. В основе этих моделей лежат представления о квазиadiaбатической динамике ионов в относительно слабом магнитном поле нейтрального слоя хвоста магнитосферы, где ионы могут размагничиваться. Показано, что функция распределения ионов может быть представлена в виде функции от интегралов движения частиц: полной энергии и квазиadiaбатического инварианта. Рассмотрены различные модификации исходного равновесия, включающие в себя учет токов замагниченных электронов, вклад ионов кислорода, асимметрию источников плазмы и эффекты, связанные с «немаксвелловским» видом функций распределения частиц. Проведено сопоставление теоретических результатов и данных наблюдений,

полученных спутниковой миссий *Cluster*. Исследованы различные плазменные неустойчивости, развивающиеся в тонких токовых слоях. Проведён анализ эволюции разрывной моды и найдены параметрические области, в которых данная мода может расти. Таким образом, на основе квазиadiaбатической модели токового слоя решён парадокс полной стабилизации разрывной моды в токовых слоях с нормальной компонентой магнитного поля. Показано, что в широком диапазоне значений параметров токового слоя и направлений распространения крупномасштабных неустойчивых волн в системе могут развиваться различные модификации дрейфовых неустойчивостей (изгибная и перетяжная моды). На основе концепции турбулентного электромагнитного поля, образующегося в результате развития и насыщения неустойчивых волн, предложен механизм ускорения заряженных частиц в турбулентных токовых слоях и получены степенные энергетические спектры ускоренных частиц.

Зелёный Л.М., Х.В. Малова, А.В. Артемьев, В.Ю. Попов, А.А. Петрукович, Тонкие токовые слои в бесстолкновительной плазме: равновесная структура, плазменные неустойчивости и ускорение частиц, Физика плазмы, том 37, № 2, с. 137–182, 2011; (Engl. Transl. Zelenyi, L. M.;

Malova, H. V.; Artemyev, A. V.; Popov, V. Yu.; Petrukovich, A. A., Thin current sheets in collisionless plasma: Equilibrium structure, plasma instabilities, and particle acceleration, Plasma Physics Reports, Volume 37, Issue 2, pp.118-160, 2011).

6.1.5. Вложенные тонкие токовые слои в хвосте магнитосферы.

Проведено исследование тонких токовых слоев, вложенных в намного более толстый изотропный токовый слой – такие структуры неоднократно наблюдались во время суббурь в хвосте магнитосферы Земли. Исходное равновесие включает в себя токи неadiaбатических ионов и замагниченных электронов, а также крупномасштабный фоновый ток, поддерживаемый горячими изотропными частицами плазмы. Обсуждаются и используются количественные параметры, описывающие такую вложенную многомасштабную систему. Используется статистика спутников *Cluster*, эмпирическая модель и самосогласованная модель, которые помогают понять процессы образования и развития вложенных токовых структур, в частности, во время суббурь. Как экспериментальные, так и теоретические данные показывают, что толщина вложенного токового слоя порядка ионного ларморовского радиуса. Вложенный токовый слой может быть описан двумя основными B_0/B_{ext} and F_0/F_{ext} , где B_0 - магнитное поле на границе вложенного слоя, B_{ext} - магнитное поле на границе фонового плазменного слоя, а F_0 и F_{ext} , величины соответствующих магнитных потоков. Во время фазы накопления суббури плотность тока вложенного слоя увеличивается, и, соответственно, растет величина магнитного поля B_0 , в то время как толщина вложенного слоя уменьшается. Слои с наиболее интенсивными токами (большими B_0) наблюдаются после взрывной фазы. Самосогласованная модель анизотропного токового слоя, состоящего из комбинации двух вложенных токовых слоев, показала, что когда вложенный токовый слой достигает предельно малой толщины (порядка ионного гирорадиуса), внутри него возникает токовый слой с характерным масштабом электронного вращения благодаря усилению дрейфа кривизны электронов.

Petrukovich, A. A.; Artemyev, A. V.; Malova, H. V.; Popov, V. Y.; Nakamura, R.; Zelenyi, L. M., Embedded current sheets in the Earth's magnetotail, Journal of Geophysical Research, Volume 116, CiteID A00I25, 2011.

6.1.6. Статистика пересечений тонких токовых слоев по данным спутников *Cluster*.

Исследована статистика 70 пересечений тонких токовых слоев спутниками *Cluster* для сравнения свойств токовых слоев на вечернем и утреннем флангах хвоста магнитосферы Земли. Особое внимание уделено свойству вложенности токовых слоев: мы определили

вложенность как $b_e = V_{ext}/B_0$ (B_0 и V_{ext} - величины магнитных полей на границах токовых слоев и в долях хвоста). Плотность тока была определена методом курлометра, и была оценена толщина токовых слоев. Было показано, что токовый слой в утреннем секторе имеет большую вложенность b_e , меньшее значение плотности тока и относительно большую толщину (в единицах ларморовского радиуса) по сравнению с вечерним сектором. Протоны в токовых слоях делятся на две популяции (носители тока и фоновые частицы). Температуры этих популяций были оценены. Распределение температуры протонов T_p внутри токового слоя аппроксимированы выражением $T_p \approx T_p(1 - \alpha T(V_x/V_{ext})^2)$, где T_p - значение температуры протонов в центральной области токового слоя. Среднее значение составляет $\alpha T \approx 0.8$. Плотность тока протонов (поток в Y - направлении) положителен на вечернем фланге и отрицателен на утреннем фланге, в то время как плотность электронного тока положительная на обоих флангах. Эта разница в плотности протонного тока на обоих флангах объясняется дрейфом $E \times B$ частиц в присутствии электростатического поля к Земле E_x . Развита простая модель электростатического поля к Земле, чтобы учесть эффекты вложенности и магнитной компоненты в направлении «утро-вечер».

Artemyev, A. V.; Petrukovich, A. A.; Nakamura, R.; Zelenyi, L. M., Cluster statistics of thin current sheets in the Earth magnetotail: Specifics of the dawn flank, proton temperature profiles and electrostatic effects, *Journal of Geophysical Research*, Volume 116, Issue A9, CiteID A09233, 2011.

6.1.7. Ускорение заряженных частиц в электромагнитной турбулентности с переменным уровнем перемежаемости.

Исследована роль перемежаемости в процессе ускорения и транспорта заряженных частиц электромагнитной турбулентностью. Предложена простая модель электромагнитной турбулентности с переменным уровнем перемежаемости. Магнитное поле описывается как суперпозиция ансамбля магнитостатических плоских волн и пространственно локализованных магнитных облаков. Амплитуды магнитных облаков распределены по перемежающейся сетке. Модель аппроксимирует основные свойства турбулентности, наблюдаемой 'in situ' в нейтральной плоскости хвоста магнитосферы Земли. Численное интегрирование траекторий частиц в подобном динамическом электромагнитном окружении показало, что, для фиксированного интервала времени, чем выше уровень перемежаемости, тем больше набор энергии. Более того, в достаточно перемежающейся турбулентности ускорение частиц происходит без значительного пространственного транспорта.

Zelenyi, L. M.; Rybalko, S. D.; Artemyev, A. V.; Petrukovich, A. A.; Zimbardo, G., Charged particle acceleration by intermittent electromagnetic turbulence, *Geophysical Research Letters*, Volume 38, Issue 17, CiteID L17110, 2011.

6.1.8. Распределение электронной температуры в тонких токовых слоях в хвосте магнитосферы Земли

Статья посвящена исследованию вертикального распределения электронной температуры в тонких токовых слоях в хвосте магнитосферы Земли. Зависимость температуры электронов от магнитного поля $T_e(V_x)$ исследовано для 62 пересечений тонких токовых слоев космическими аппаратами Cluster. Профили $T_e(V_x)$ аппроксимированы простым выражением $T_e \approx T_{e\max}(1 - \alpha(V_x/V_{ext})^2)$, где α - постоянный параметр, $T_{e\max}$ - максимальное значение температуры электронов и V_{ext} - амплитуда магнитной компоненты V_x , полученной из баланса давлений плазмы в вертикальном направлении. Среднее значение параметра $\alpha \approx 1$. Профили $T_e(V_x)$ описаны в рамках теории адиабатического электронного нагрева в процессе плазменной конвекции к Земле.

Сравнение между наблюдаемыми величинами α и теоретическим предсказанием позволяет оценить масштаб L_x наблюдаемых токовых слоев вдоль магнитосферного хвоста и отношение величин L_x и толщины токового слоя L_z . Для большинства наблюдаемых токовых слоев L_x принадлежит интервалу масштабов от 5RE до 20RE и среднее отношение масштабов составляет приблизительно $L_x/L_z \approx 25$.

Artemyev, A. V.; Zelenyi, L. M.; Petrukovich, A. A.; Nakamura, R., Hot electrons as tracers of large-scale structure of magnetotail current sheets, *Geophysical Research Letters*, Volume 38, Issue 14, CiteID L14102, 2011.

6.1.9. Одномерная модель токового слоя.

Представлена модель токового слоя, учитывающая продольные токи и конечную поперечную компоненту магнитного поля. Модель основана на сохранении квазиadiaбатического инварианта движения ионов плазмы, в то время как для электронов использовано МГД - приближение. Часть тока через слой имеет параллельное к магнитному полю направление благодаря шире магнитного поля, однако перпендикулярная компонента тока также присутствует в системе. Различие плазменного давления в центре токового слоя и на его границах составляет половину от его значения в модели, свободной от параллельных токов. Значение модели и ее приложения к экспериментальным исследованиям в статье обсуждаются.

Artemyev, A. V., A model of one-dimensional current sheet with parallel currents and normal component of magnetic field, *Physics of Plasmas*, Volume 18, Issue 2, pp. 022104-022104-4, 2011.

6.1.10. Нелинейная динамика заряженных частиц под действием косых электромагнитных волн.

Исследована динамика заряженных частиц под действием электромагнитной волны и внешнего магнитного поля. Динамика описывается гамильтоновой системой с быстрыми и медленными переменными. Показано, что основным эффектом является захват частицы в резонанс с волной и выход из резонанса. Получено соотношение для вариации энергии захваченной частицы. Обсуждаются возможные применения полученных результатов.

Vasiliev A., Neishtadt A., Artemyev A. Nonlinear dynamics of charged particles in an oblique electromagnetic wave. *Physics Letters A*, 2011, v. 375, p. 3075–3079

6.1.11. Ускорение заряженных частиц при случайных флуктуациях.

Предложено количественно описание ускорения частицы в серфотронном резонансе в присутствии случайных флуктуаций магнитного поля. Показано, что захват в серфотронный резонанс является достаточно устойчивым по отношению к влиянию флуктуаций магнитного поля. Получены аналитические оценки максимальной энергии, которую может набрать частица в таком резонансе.

Artemyev A., Vainchtein D., Neishtadt A., Zelenyi L., Resonant acceleration of charged particles in the presence of random fluctuations, 2011. *Phys. Rev. E*, 84, 046213, doi: 10.1103/PhysRevE.84.046213

6.1.12. Скачки адиабатического инварианта при вырожденной седловой особой точке

Рассмотрена динамика заряженной частицы в полностью бифурцированном токовом слое. Показано, что данная динамика описывается гамильтоновой системой с быстрыми и медленными переменными (две степени свободы). Одна степень свободы соответствует медленным переменным, в то время, как вторая степень свободы – быстрым. Характерное отношение скоростей изменения медленных и быстрых переменных определяется малым

параметром карра. При каждом фиксированном значении медленных переменных на фазовой плоскости быстрых переменных имеется сепаратриса, проходящая через седловую точку. Изменение медленных переменных может привести к тому, что траектория частицы пересечёт сепаратрису на плоскости быстрых переменных. Переменная действия для быстрых переменных является адиабатическим инвариантом для полной системы, пока траектория находится вдали от сепаратрисы. Прохождение вблизи от сепаратрисы приводит к скачку адиабатического инварианта. Система с полностью бифурцированным токовым слоем соответствует случаю, когда особая седловая точка является вырожденной. Мы получили асимптотическую формулу для скачка адиабатического инварианта, который оказался пропорциональным $k^{3/4}$ (в классическом случае, соответствующем не вырожденной особой точке, скачок адиабатического инварианта пропорционален k).

Artemyev A.V., Neishtadt A.I., Zelenyi L.M., Jumps of adiabatic invariant at the separatrix of a degenerate saddle point, 2011. Chaos, 21, 043120, doi:10.1063/1.3657916

Отв.: Зеленый Л. М., академик РАН, д.ф.-м.н., т. 333-25-88, lzeleny@iki.rssi.ru
Малова Х. В., д.ф.-м.н., в.н.с., тел. 333-25-00, hmalova@yandex.ru
Петрукович А. А., д.ф.-м.н., тел. 333-32-67, apetruko@iki.rssi.ru

6.2. Предложен механизм передачи энергии между различными группами энергичных частиц при их резонансном взаимодействии с волной в радиационных поясах Земли, в котором сама волна является лишь «посредником» (ИКИ)

Обмен энергией между волной и резонансными (обычно энергичными) частицами является существенным моментом во взаимодействии волн и частиц в плазме. Если резонансное взаимодействие в неустойчивой магнитоактивной плазме включает два или более резонансов, то возбуждение волны может в то же время сопровождаться обменом энергией между различными группами энергичных частиц. Этот эффект особенно выражен в случае, когда плазма находится на границе устойчивости. Такая ситуация часто реализуется в радиационных поясах Земли.

Shklyar, D.R., 2011. Wave-particle interactions in marginally unstable plasma as a means of energy transfer between energetic particle populations. Physics Letters A **375**, 1583–1587.

Shklyar, D.R. Particle-wave-particle interactions involving whistler-mode waves in the magnetosphere. XXX URSI General Assembly and Scientific Symposium, H03.7, August 13-20, 2011 Istanbul, Turkey. Abstract Book & Papers. ISBN 978-1-4244-5118-0, 2011. (<http://ursigass2011.org/abstracts/ursi/H03-7.pdf>)

Отв.: Шкляр Д. Р., д.ф.-м.н., зав. лаб., т. 333 45 34, david@iki.rssi.ru

6.3. Установлено, что при нелинейном взаимодействии квазимонохроматических волн и частиц в неоднородной плазме наиболее существенный обмен энергией происходит не между волной и частицами, как это считалось раньше, а между двумя группами резонансных частиц: так называемыми «захваченными» и «пролетными» частицами (ИКИ)

Если амплитуда квазимонохроматической волны, распространяющейся в неоднородной плазме, достаточно велика, то существуют «захваченные» по фазе частицы, энергия которых возрастает или убывает в зависимости от «знака» неоднородности. Изменение плотности энергии таких частиц может существенно превосходить плотность энергии волны, что противоречит закону сохранения энергии, если предполагать, как это считалось ранее, что источником (или стоком) энергии является волна. Показано, что в

действительности рост (или уменьшение) энергии «захваченных» частиц обусловлен передачей энергии от (κ) «пролетных» частиц, а волна лишь является посредником в этом процессе. Важность понимания этого процесса состоит в том, что оно дает возможность установить правильные количественные ограничения на изменение энергии частиц. Полученные результаты важны с точки зрения, по крайней мере, двух фундаментальных процессов в физике магнитосферы: динамики частиц в радиационных поясах и триггерного излучения.

Shklyar, D.R., 2011. On the nature of particle energization via resonant wave-particle interaction in the inhomogeneous magnetospheric plasma. *Ann. Geophys.* 29, 1179-1188.

Отв.: Шкляр Д. Р., д.ф.-м.н., зав. лаб., т. 333 45 34, david@iki.rssi.ru

6.4. Выполнено исследование неустойчивости Кельвина-Гельмгольца в цилиндрической геометрии (ИКИ)

Аналитически получено общее дисперсионное уравнение и численно проанализированы его решения в зависимости от параметров задачи. В приближении несжимаемой плазмы подробно исследована устойчивость системы в широком диапазоне параметров, и показано, что система абсолютно устойчива, если скорость потока меньше суммы альфвеновских скоростей в потоке и в окружающей плазме. Построена диаграмма устойчивости цилиндрического потока в зависимости от величин магнитного поля вне и внутри потока и отношения плотности окружающей поток плазмы к плотности плазмы в потоке. Показано, что при исследовании устойчивости цилиндрического потока наибольший интерес представляет винтовая мода, которая приводит к смещению центра масс потока и закручиванию его по спирали как целого. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в ходе четырехспутникового проекта CLUSTER в пограничной области плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли, показало, что рассматриваемая неустойчивость может являться источником генерации наблюдаемых колебаний, причем развитие винтовой моды позволяет объяснить наблюдаемую деформацию потока как целого в двух направлениях, перпендикулярных скорости распространения потока.

Буринская, Т.М., М.М. Шевелёв, Ж.-Л. Рош. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца для ограниченного потока плазмы в продольном магнитном поле, *Физика плазмы*, Т.37, №1, стр. 46-59, 2011.

Шевелёв, М.М., Т.М. Буринская. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца для цилиндрического потока плазмы с произвольной температурой. *Физика плазмы*, Т. 37, №12, стр. 1081-1059, 2011.

Отв.: Т.М. Буринская, к.ф.-м.н., в.н.с., 333 45 34, tburinsk@iki.rssi.ru
М.М. Шевелёв, аспирант, м.н.с., mposimba@gmail.com

6.5. Численно изучено затухание Ландау ленгмюровских волн в плазме, распространяющихся перпендикулярно внешнему однородному магнитному полю (ИКИ)

Показано, что эволюция волны носит бифуркационный характер, т.е. при изменении некоторых управляющих параметров (а именно, соотношений между гиропериодом, обратной плазменной частотой и нелинейным временем) затухание волны прекращается, или, наоборот, начинается. Например, если в отсутствии магнитного поля волна затухала (т.е. её эволюция происходила в режиме Ландау), то магнитное поле препятствует затуханию волны. Если же в отсутствии магнитного поля волна не затухала (режим О'Нейла), то магнитное поле влияет на эволюцию волны совершенно иным образом: очень слабое магнитное поле (когда гиропериод большой по сравнению с остальными

характерными временами) не вызывает качественных изменений в поведении волны, однако увеличение магнитного поля до некоего порогового значения приводит к затуханию волны. Если же магнитное поле очень сильно, то оно препятствует затуханию волны, как и в режиме Ландау.

Долгоносков, М.С., И.В. Кузичев, Л.М. Зеленый. Эволюция электростатической волны, распространяющейся перпендикулярно однородному магнитному полю в плазме. Труды Московского физико-технического института (государственного университета), т. 3, вып. 2, стр. 53-63, 2011.

Отв.: М.С. Долгоносков, к.ф.-м.н., н.с., russia.on.mars@gmail.com

И.В. Кузичев, аспирант, м.н.с., Mar-cuss@yandex.ru

6.6. Проведено численное исследование справедливости квазилинейной теории диффузии в слабой турбулентности (ИКИ)

Представлены новые результаты численного моделирования неустойчивости теплого электронного пучка в бесстолкновительной плазме. Они основаны на теоретической модели, самосогласованно учитывающей резонансные взаимодействия частиц пучка с многими волнами; эта модель близка к начальной системе квазилинейных уравнений, с которой начинается стандартный вывод уравнений диффузии в теории слабой турбулентности, однако не использует предположение о случайных фазах волн. С высокой точностью с помощью симплектического кода вычислены траектории большого числа частиц в течение длительного времени. Используя эти траектории проводится статистический анализ движения частиц с помощью различных алгоритмов. Изучена динамика релаксации пучка и установление волнового спектра, и проведено их сравнение с аналитическими решениями, получаемыми в квазилинейной теории слабой турбулентности. Наиболее интересные результаты касаются наличия сильной и длительно сохраняющейся неоднородности в энергетическом спектре волн, что, по-видимому, связано с резкими скачками скорости частиц, которые не подчиняются законам локальной гауссовской диффузии. Получены количественные оценки коэффициентов диффузии, которые сравниваются с предсказаниями теории слабой турбулентности.

Volokitin, A., and C. Krafft, Velocity diffusion in plasma waves excited by electron beams : a numerical experiment, Phys. Plasmas, submitted.

Отв.: А.С. Волокитин, к.ф.-м. н., ст.научн.сотр., email: a.volokitin@mail.ru

6.7. Развитие методов расчета самосогласованных электромагнитных полей и параметров бесстолкновительной плазмы для локальных и волновых возмущений в магнитосфере Земли (ИКИ)

Исследована структура и устойчивость стационарной поперечной волны с захваченными заряженными частицами, распространяющейся в изотропной плазме со скоростью меньшей скорости света, по отношению к продольным возмущениям. Обнаружены два типа неустойчивостей, в результате которых возбуждаются электростатические и электромагнитные колебания. Установлено общее дисперсионное уравнение, которое позволяет исследовать основные режимы этих неустойчивостей. Определены спектры неустойчивых колебаний и максимальные инкременты роста малых возмущений. Выявлено существенное отличие неустойчивости досветовой волны от неустойчивостей, близких по геометрической конфигурации, свистовых волн с захваченными электронами. Построен ряд моделей досветовых волн с эллиптической поляризацией. Определены основные отличия структуры таких волн от строения подобных волн, поляризованных по кругу.

Продолжена необходимая работа для последовательного описания локализованных трехмерных возмущений бесстолкновительной плазмы. Разработаны алгоритмы для решения широкого класса смежных задач физики космической плазмы и подготовлено программное обеспечение для их реализации.

В.Л. Красовский. Влияние захваченных частиц на скорость циркулярно поляризованных волн в изотропной плазме. XLVII Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. Тезисы докладов. Москва, Российский университет дружбы народов, 2011. Стр.13-14

Отв.: Красовский В. Л., д.ф.м.н., тел.8-495-333-53-78, vkrasov@mx.iki.rssi.ru

6.8. Исследование разрушения адиабатической инвариантности на резонансах и хаотизации динамики в системах с быстрыми и медленными движениями, в частности, в задачах о движении заряженных частиц в электромагнитных полях сложной конфигурации (ИКИ)

Исследована динамика заряженной частицы в поле электромагнитной волны, распространяющейся под углом к фоновому магнитному полю. Показано, что динамика может быть описана гамильтоновой системой с медленными и быстрыми переменными. В задаче возможен резонанс типа «волна-частица» между скоростью ларморовского движения частицы в однородном магнитном поле и фазовой скоростью волны. Основными явлениями являются захват частицы в резонанс, выход из резонанса и рассеяние на резонансе. Показано, что всякий захват сопровождается выходом из резонанса, определены параметры входа-выхода. Обнаружено, что вся энергия, набираемая частицей между захватом и выходом из резонанса, аккумулируется в единственной степени свободы, соответствующей движению вдоль фонового магнитного поля. Обсуждены возможные приложения полученных результатов для описания процессов ускорения частиц нелинейными волнами. По результатам работы опубликована статья.

А.Нейштадт, А.Васильев, А.Артемьев. Индуцированное резонансами серфотронное ускорение релятивистской частицы. Московский математический журнал, т.11, № 3, с.531-545 (2011)

A.Neishtadt, A.Vasiliev and A.Artemyev. Resonance-induced surfatron acceleration of a relativistic particle, Moscow Mathematical Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 531-545 (2011).

А.И.Нейштадт (руководитель), д.ф.-м.н., т. 333-51-45, e-mail: aneishta@iki.rssi.ru

Отв.: А.В.Артемьев, к.ф.-м.н., т. 333-2500, e-mail: ante0226@yandex.ru

А.А.Васильев, к.ф.-м.н., т. 333-53-46, e-mail: valex@iki.rssi.ru

6.9. Статистические характеристики турбулентных течений проводящей жидкости над твердой поверхностью (ИКИ)

Рассмотрены результаты экспериментов для турбулентных течений в тонком слое проводящей жидкости над твердой поверхностью, возбуждаемых силой Ампера при пропускании тока и действия пространственно-периодического магнитного поля. Показано, что статистические характеристики течений проявляют трехмерную динамику даже на масштабах по горизонтали, на порядок превышающих толщину слоя. При этом продольные структурные функции третьего порядка поля скорости приближенно линейны по пространственному смещению и отрицательны, как в трехмерной турбулентности, из-за доминирующего вклада диссипации энергии при выполнении граничного условия

прилипания на нижней поверхности. Для уравнения баланса энергии проведены оценки диссипации и основных слагаемых производства энергии.

А.Е.Гледзер, Е.Б.Гледзер, А.А.Хапаев, О.Г.Чхетиани. Структурные функции квазидвумерной турбулентности в лабораторном эксперименте. ЖЭТФ, 2011, том 140, вып.3, с.590-605

Отв.: Чхетиани О. Г., д.ф.-м.н., тел.8-495-333-22-23, ochkheti@mx.iki.rssi.ru

6.10. Анализ оптимальных условий для эффективного ультрарелятивистского серфотронного ускорения заряженных частиц в космической плазме волновыми пакетами с плавной огибающей амплитуды (ИКИ)

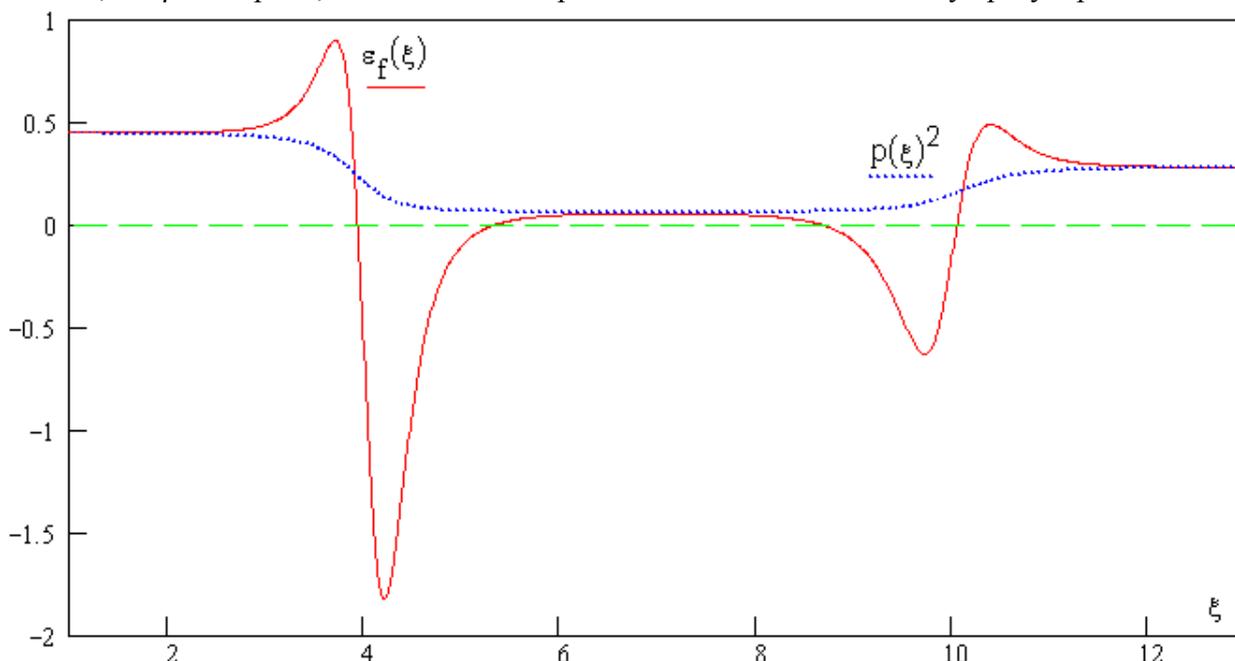
Проведены численные расчеты захвата и последующего ультрарелятивистского ускорения заряженных частиц пакетами электромагнитных волн с плавной огибающей амплитуды в космической плазме (механизм серфинга зарядов на волнах) при распространении волн поперек внешнего магнитного поля. Задача решается численно на основе нелинейного, нестационарного уравнения второго порядка для фазы на несущей частоте волнового пакета на траектории ускоряемой частицы. Целью работы является исследование эффективности ускорения заряженных частиц волновым пакетом с плавной огибающей его амплитуды, оптимальных условий для ультрарелятивистского серфинга зарядов. В центральной части пакета максимальная амплитуда электрического поля была выше порогового значения, что обеспечивало возможность захвата заряженных частиц электромагнитной волной в режим серфинга. Начальные энергии частиц были существенно релятивистские. Расчеты показали, что в диапазоне благоприятных фаз, который оказывается достаточно широким, при реализации черенковского резонанса имеют место захват и последующее ультрарелятивистское ускорение зарядов. Набор энергии частицей возрастает с увеличением характерной полуширины волнового пакета. Рассмотрена временная динамика компонент импульса и скорости ускоряемых частиц, фазовая плоскость заряда, характерные особенности их траектории, зависимость эффективности ускорения от исходных параметров задачи для достаточно больших времен ускорения. Проведены расчеты траекторий ускоряемых заряженных частиц, возникновение циклотронного вращения после вылета из эффективной потенциальной ямы с возможностью повторного их возвращения в центральную часть пакета. Отмечена возможность дополнительного ускорения частиц после ларморовского вращения при попадании их в благоприятную фазу на несущей частоте. В случае неблагоприятного соотношения знаков поперечных компонент импульса вначале идет торможение частицы вдоль волнового фронта, а после смены знака этой компоненты импульса имеет место сильное ускорение заряда. Темпы торможения-ускорения захваченной волной частицы были практически постоянными. Важно то, что на стадии торможения заряд остается захваченным. При благоприятном соотношении знаков компонент скорости заряда $v_x(0)$, $v_y(0)$ его ускорение максимально. Оптимальным условием резкого повышения эффективности серфотронного ускорения заряженных частиц является также близость фазовой и групповой скоростей на несущей частоте пакета.

Проведенное исследование представляет интерес для интерпретации экспериментальных данных по регистрации потоков релятивистских частиц в космических условиях включая околоземное пространство. Серфотронный механизм может работать как в экстремальных условиях (взрывы сверхновых), так и в более спокойной обстановке, например, в солнечной гелиосфере.

Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Кузнецов Е.А., Михайловская Л.А. Зависимость серфотронного ускорения зарядов электромагнитной волной от знака компоненты импульса частицы вдоль волнового фронта. Всероссийская конференция по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. Тезисы докладов, Москва, РУДН, 2011, с.20-21.

6.11. Анализ физической кинетики нелинейных (плазменных) систем и возникновения степенных спектров возмущений электронной компоненты, гамма излучения в грозвых разрядах (ИКИ)

Предполагая тормозной механизм гамма-всплесков, выявлена форма (вид) функции распределения электронов, приводящая к наблюдаемым степенным спектрам излучения: с показателями Парето $\beta \sim 3$ для частот ω гамма-излучений, соответствующих энергии $\mathcal{E} > 10$ Мэв, и с $\beta = 1$ при ω , отвечающих энергиям $\mathcal{E} \ll 10$ Мэв. Используя регулярный метод



На рисунке приведен вариант профилей диэлектрической проницаемости и квадрата показателя преломления при безотражательном прохождении неоднородного слоя. Видно кардинальное их различие уже в линейной задаче. Следует отметить, что рассматриваемые точно решаемые модели могут выявлять новые особенности в динамике колебаний и в распространении электромагнитных волн через неоднородную плазму, в развитии нелинейных процессов при сильной неоднородности, а также они могут демонстрировать интересные возможности практических приложений при контролируемых изменениях ее параметров. Безотражательное туннелирование волн через плазму важно для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме в астрофизике, оно представляет интерес для повышения эффективности поглощения мощного электромагнитного излучения при нагреве плазмы до термоядерных температур за счет проникновения волн в область достаточно плотной плазмы. Далее, в радиофизике с этим связано направление исследований по повышению эффективности просветляющих и поглощающих покрытий в диапазоне радиоволн, для разработки тонких радиопрозрачных обтекателей для антенн, где интерес представляет поиск оптимального распределения диэлектрической проницаемости по толщине просветляющего слоя, при котором будут обеспечены минимальный коэффициент отражения или эффективная передача электромагнитных сигналов от антенн, покрытых слоем плотной плазмы. Выполненный для ряда ситуаций анализ показал, что можно обеспечить безотражательное туннелирование электромагнитных волн из вакуума в неоднородный слой несмотря на скачок диэлектрической проницаемости на границе раздела. Таким образом анализ точно решаемых моделей позволит значительно улучшить

существующие представления о пространственно-временной динамике электромагнитных полей в неоднородных диэлектрических структурах с сильной пространственной дисперсией.

Ерохин Н.С., Захаров В.Е. Безотражательное прохождение электромагнитной волны через неоднородные плазменные слои. Физика плазмы, 2011, т.37, № 9, с. 818-823.

Ерохин Н.С., Захаров В.Е. Генерация сильных всплесков поля электромагнитной волны при безотражательном просветлении слоя неоднородной среды. ДАН, 2011, т.439, № 2, с.180-183.

Отв.: Ерохин Н. С., д.ф.м.н., тел.8-495-333-41-00, nerokhin@mx.iki.rssi.ru

6.12. Использование вейвлет-преобразования в квантовой теории поля, анализ поправок в эффекте Казимира (ИКИ)

Вейвлет-преобразование рассматривается как перспективный инструмент регуляризации расходимостей в квантовой теории поля. В работе на основе непрерывного вейвлет-преобразования построено калибровочное преобразование для масштабно зависимых полей вида $A_m(x) \rightarrow A_m(x) + m f_a(x)$, где $A_m(x)$ амплитуда поля $A_m(x)$, измеренная в точке x с разрешением a , и получены нелокальные тождества Уорда-Такахаша, следующие из калибровочной инвариантности для этих полей. В пространстве масштаб-импульс эти тождества представлены в интегральной форме через Фурье-образ вершинного оператора, вершинную функцию и базисный вейвлет. Результат представляет интерес для физики плазмонов и плазменных явлений в астрофизике.

Рассмотрены поправки к эффекту Казимира, зависящие от разрешения измерительного прибора. В современных наноэлектронных устройствах, таких как атомный силовой микроскоп, сверхтонкие конденсаторы, микрополостные резонаторы, законы обычной электродинамики уступают место квантовым законам. Силы, испытываемые отдельными атомами, имеют квантовые флуктуации, связанные как с флуктуациями самих атомов и их взаимодействием с окружением, так и с вакуумными флуктуациями электромагнитного поля и, следовательно, становятся существенными радиационные поправки квантовой электродинамики. Измерительный прибор в эти расчеты не включается, а его состояние описывается классически. В данной работе исследуются поправки к силе Казимира, обусловленные конечностью смещения одной из проводящих пластин при измерении силы. Казимир в 1948 году предположил, что сила притяжения между двумя проводящими пластинами зависит только от расстояния между пластинами, постоянной Планка \hbar и скорости. В связи с развитием нанотехнологий увеличивается поток работ, связанных с проявлением эффекта Казимира в наномеханике и фотонике. Поскольку при вычислении силы Казимира возникают сингулярности, в работе используя обрезывающую функцию специального вида, найдены поправки к силе Казимира между двумя параллельными пластинами. Если разрешение прибора ограничивает частоты вакуумных флуктуаций, то найденные поправки могут быть получены экспериментально путем проведения измерений при одном и том же невозмущенном расстоянии между пластинами, но с разной амплитудой смещения в процессе измерений. Результаты исследований важны для корректной интерпретации данных измерений на наномасштабах и могут быть использованы в квантовой электродинамике метаматериалов, в наномеханике, а также при квантовополевых расчетах в физике высоких энергий.

Albeverio, S. and Altaisky, M.V. A remark on gauge invariance in wavelet-based quantum field theory. *New Advances in Physics*, Vol.5, 2011, pp.1-8.

Altaisky M.V. and Kaputkina N.E. On the corrections to the Casimir effect depending on the resolution of measurement. *Письма в ЖЭТФ*, 2011, т.94, вып.5, с.371-373.

Отв.: Алтайский М. В., д.ф.м.н., тел.8-495-333-53-56, altaisky@mail.ru

6.13. Устойчивость солитонов и волновой коллапс (ИКИ)

Рассмотрены два альтернативных сценария эволюции нелинейных волновых систем, в результате чего формируются либо солитоны, либо возникают коллапсы. Для первого сценария достаточно, чтобы гамильтониан был ограничен снизу (либо сверху), и тогда солитон, реализующий этот минимум (максимум), будет устойчивым (по Ляпунову). В этом случае приход к такому экстремуму осуществляется за счет излучения волн малой амплитуды - процессу, который отсутствует в системах с конечным числом степеней свободы. На примере уравнений НУШ и системы трех волн показано, как используя метод интегральных оценок, основанный на теоремах вложения Соболева, можно установить строго ограниченность гамильтонианов и соответственно устойчивость солитонов, реализующих минимум.

Впервые получена ограниченность гамильтониана снизу для системы трех волн для произвольного дисперсионного тензора. Найдены ограничения на величину расстройки частоты от трехволнового резонанса для существования устойчивых солитонов для этой системы. В случае неограниченности гамильтонианов снизу в волновых системах должен реализовываться коллапс, который можно понимать как процесс падения некоторой частицы в неограниченном потенциале. Обсуждается также роль излучения в коллапсе.

Кузнецов Е.А. Устойчивость солитонов и волновой коллапс. Труды научной школы "Нелинейные волны - 2010", под ред. А.В. Гапонова-Грехова и В.И. Некоркина, ИПФ РАН, Нижний Новгород, стр. 205-230 (2011).

Отв.: Кузнецов Е. А., д.ф.м.н., 8-495-333-41-00, kuznetso@itp.ac.ru

6.14. Нелинейная динамика магнитогидродинамических течений тяжёлой плазмы в приближении мелкой воды (ИКИ)

Найдены все центрированные автомодельные решения системы уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды: магнитогравитационные волны разрежения, магнитогравитационные ударные волны и альфвеновские волны. Решена задача распада произвольного разрыва для уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды над ровной поверхностью. Показано, что решение представляет собой одну из пяти конфигураций: «две центрированные магнитогравитационные волны разрежения, две альфвеновские волны», «две магнитогравитационные ударные волны, две альфвеновские волны», конфигурация «магнитогравитационная волна разрежения, обращенная назад, правая магнитогидродинамическая ударная волна, две альфвеновские волны», «левая магнитогравитационная ударная волна, магнитогравитационная волна разрежения, обращенная вперед, две альфвеновские волны», «две гидродинамические волны Римана, зона вакуума». Из полученных результатов следует, что решение является суперпозицией двух решений: распада разрыва для мелкой воды без магнитного поля (с учётом изменённой скорости звука) и двух альфвеновских волн. При нулевом магнитном поле две альфвеновские волны совпадают и превращаются в контактный разрыв. Конфигурация «две гидродинамические волны Римана, зона вакуума» существенно отличается от остальных, поскольку может реализовываться лишь при изначальном равенстве нулю нормальной компоненты магнитного поля.

Карельский К.В., Петросян А.С., Тарасевич С.В. Нелинейная динамика магнитогидродинамических течений тяжёлой жидкости в приближении мелкой воды. ЖЭТФ, 2011, том 140, вып. 3(9), стр.606-620.

Karelsky Kirill, Petrosyan Arakel, Tarasevich Stepan. Simple waves in magnetohydrodynamic flows of heavy fluid over an arbitrary surface in shallow water approximation. Proceedings. 8 th International PAMIR conference on "Fundamental and Applied MHD" Borgo, Corsica, France, 2011, 261-265.

Отв.: Петросян А.С., д.ф.-м.н., т.: 333-54-78, apetrosy@iki.rssi.ru

6.15. Использование спутниковых данных для понимания процессов переноса горячей плазмы, удерживаемой в термоядерных установках (ИКИ, НИЦ «Курчатовский институт»)

Сравнительный анализ фундаментальных свойств флуктуаций в турбулентных погранслоях (ТПС) вблизи границ плазмы, удерживаемой в термоядерных установках, и на магнитосферных границах (по данным спутников ИНТЕРБОЛ-1, GEOTAIL и CLUSTER) показал схожесть их основных статистических характеристик, в том числе, зависимости от масштабов (скейлинга) структурных функций (см. Рисунок) и параметров мультифрактальности. Наблюдаются перемежаемый характер флуктуаций и аномальный перенос массы и импульса за счет спорадических инъекций быстрых плазменных потоков (деформирующих магнитосферу на глубину зоны взаимодействия с потоком и проникающих на стенки камер), которые имеют существенно негауссовский характер функции распределения значений параметра X (плотность и поток плазмы и величина магнитного поля) и описываются лог-пуассоновской моделью с квазиодномерными диссипативными структурами и со скейлингом $\zeta(q)$ [1]:

$$\zeta(q) = (1-\Delta)\frac{q}{3} + \frac{\Delta}{1-\beta} \left[1 - \beta^{\frac{q}{3}} \right]$$

где $S_q(\tau) = \langle |\delta\tau X|^q \rangle \sim \tau^{\zeta(q)}$ – структурная функция порядка q , $\delta\tau X = X(t+\tau) - X(t)$.

Закон среднеквадратичного смещения частиц, $\langle \delta x^2 \rangle$, со временем, τ , полученный из экспериментально определенных параметров лог-пуассоновского распределения Δ и β , $\langle \delta x^2 \rangle \sim \tau^\alpha$, с показателем $\alpha = 1 + \Delta(1-\beta)/\beta \approx 1,2 \div 1,8$ [1,2] свидетельствует о наличии супердиффузии в изучаемых ТПС как в термоядерных установках, так и на границе магнитосферы.

Преимуществом магнитосферных измерений является малый размер датчиков по отношению к характерным масштабам (инерционные длины и гирорадиусы) и малые характерные частоты из-за много меньшего магнитного поля и плотности. Лабораторные же измерения позволяют получить множественные пространственные профили (с меньшим разрешением), для которых были бы необходимы несколько десятков спутников.

Определение характера обобщенного диффузионного процесса из регулярных данных является одним из шагов на пути количественного описания процессов переноса в ТПС.

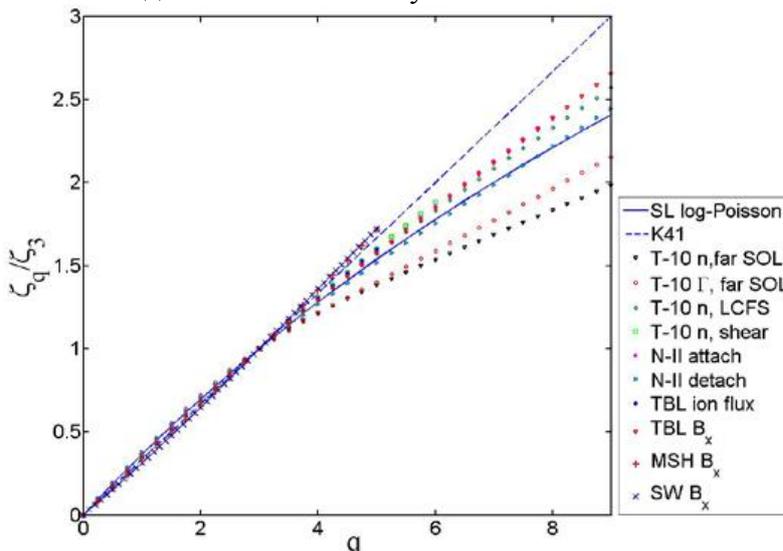


Рис. 1. Скейлинги $\zeta(q)/\zeta(3)$, нормированные на скейлинг 3 порядка, для ТПС в термоядерной и геомагнитной плазме [1]. Колмогоровский K41 (пунктир) и лог-пуассоновской с $\beta=\Delta=2/3$ (линия) спектры. Токамак T-10 (T-10 n far SOL – плотность плазмы, T-10 Г far SOL – поток частиц), у последней замкнутой магнитной поверхности (T-10 LCFS), и в слое, разрушенном широм скорости (T-10 Shear); в NAGDIS-II при ухудшенном (N-II attach) и при улучшенном удержании плазмы (N-II detach); поток ионов в ТПС по данным «ИНТЕРБОЛ-1» (TBL ion flux, 29.03.1996 г.), магнитное поле в ТПС (TBL Bx, 19.06.1998 г.) и вне ТПС (MSH Bx), в солнечном ветре (SW Bx).

В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зеленый, Наблюдения перемежаемости и обобщенного самоподобия в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы: на пути к определению количественных характеристик переноса, УФН, т. 181, №9, с. 905-952, 2011.

Отв.: С. П. Савин, д.ф.-м.н., т. 333 11 00, E-mail: ssavin@iki.rssi.ru

6.16. Многомасштабные каскадные процессы в физике Солнца и солнечного ветра (ГАО, руководитель: д.ф.-м.н. Н.Г. Макаренко)

Мы применяли методы геометрии случайных полей к магнитограммам *MDI SOHO*, содержащим вспышечные АО. Нашей целью было описание эволюции магнитного поля активных областей Солнца (АО) в терминах функционалов Минковского: характеристики Эйлера и периметра вычисленных на множествах выбросов поля за заданный уровень. Эвристические идеи о связи топологии и геометрии магнитного поля АО с ее вспышечной продуктивностью были резюмированы еще в 1972 г. [1]. Считалось, что предвестники больших вспышек следует искать в изменении *сложности* АО. Так, в качестве признаков рассматривались слияние отдельных пятен, возникновение δ конфигурации, ориентация магнитной оси группы, максимальный градиент поля, длина и кривизна *нейтральной линии* и т.п. Многие из этих признаков являются коррелированными. Их эффективность проверялась статистически, по выборке содержащей различные АО. Недавние публикации, (см., например, [2,3]), посвященные предвестникам, содержат фактически варианты из списка Смита [1]. Предлагаемые нами дескрипторы являются корректными обобщениями известных вариантов. Они предпочтительны, потому что опираются на типичные свойства случайных полей и функций с ограниченной вариацией.

Данные. *MDI SOHO* магнитограмма полного диска Солнца представляет собой матрицу 1024x1024 пикселей, содержащую значения напряженности магнитного поля, направленной по лучу зрения; Разрешение данных составляет $\sim 2\text{''}/\text{пиксель}$ [4]. Крупнозернистая сетка аргументов не позволяет корректно определить напряженность поля, из-за неразрешимых элементов внутри пикселя. Поэтому, в действительности, следует говорить о плотности потока, которая зависит от разрешения и совпадает с напряженностью в асимптотическом пределе [5]. Мы использовали временную последовательность магнитограмм с дискретом 96 мин. Регламентированный уровень шумов - около 20 Гс; на практике шумы не меньше 70 Гс. Верхний предел напряженности, в который можно верить, по-видимому, не превышает 1500 Гс.

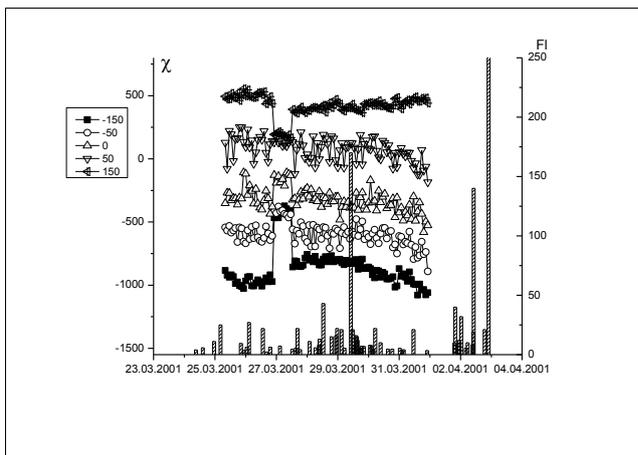


Рис.1. Эволюция эйлеровой характеристики во времени для АО 9393. Кривые $\chi(u)$ приведены для $u = \{-150, -50, 0, 50, 150\}$ Гс.

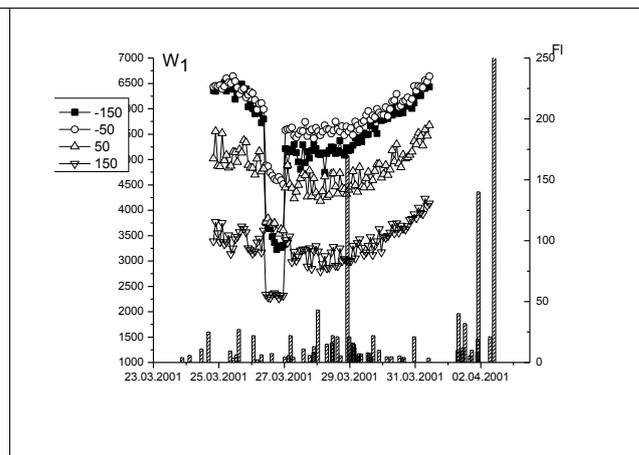


Рис.2. Эволюция периметра во времени для АО 9393. Кривые W_1 приведены для $u = \{-150, -50, 0, 50, 150\}$ Гс.

Основной результат. Функционалы Минковского, периметр и характеристика Эйлера, являются удобным контекстом для формализации богатой феноменологии вспыхивающего прогноза. Они представляют собой корректные обобщение наиболее известных эвристических предвестников. Функционалы легко вычисляются на множествах выбросов напряженности магнитограмм выше заданного уровня и, следовательно, слабо зависят от шумов и калибровки *MDI*-данных. Прогностическая ценность функционалов должна быть верифицирована на статистически значимой выборке вспыхивающе-активных АО.

Л. М. Каримова, О. А. Круглун, Н. Г. Макаренко, Н. В. Романова. Степенной закон распределения в статистике отказов в работе бортовой аппаратуры космических аппаратов //Космические исследования, 2011, Т 49, № 5, С. 470–475

И. С. Князева, Н. Г. Макаренко, М. А. Лившиц Выявление всплывтия нового магнитного поля из топологии SOHO/MDI магнитограмм. //Астрон.ж. 2011,Т. 88, №5, С. 503–512

O.S. Yakovchouk, I.S Veselovsky, N.G. Makarenko Recurrence time statistics of the most powerfrul perturbations on the Sun and in the heliosphere//Cent. Eur. Astrophys. Bull (2011) , P. 51-58

Заключение

План мсследований на 2011 год выполнен.Результаты работы по программе ОФН- VI.15 показали эффективность и результативность решения Президиума РАН об организации работ по программам отделений. На успех Программы, подтверждающий лидирующую роль РАН в проведении фундаментальных исследований по тематике ОФН- VI.15, указывают большой интерес неакадемических организаций к участию в Программе и высокое цитирование результатов в различных международных изданиях. Совет Программы, равно как и все участники проектов, считают целесообразным в каком-нибудь виде продолжить в будущем Программу Отделения физических наук «Плазменные процессы в солнечной системе».

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
средств по организациям-исполнителям заданий
Программы фундаментальных исследований Отделения физических
наук РАН
«Плазменные процессы в солнечной системе» на 2011 год
(название программы)

№ п/п	Наименование организации	Объем финансирования (тыс. рублей) в 2011 году
1.	Институт космических исследований (включая Главную астрономическую обсерваторию)	2350
	1.1. в том числе ИКИ	1960
	1.2. в том числе ГАО	390
2.	Институт прикладной физики	1120
3.	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн	650
4.	Институт радиотехники и электроники	650
5.	Институт общей физики	350
6.	Физический институт (включая Пушинскую радиоастрономическую обсерваторию Физического Института)	360
	6.1. в том числе ФИ	120
	6.2. в том числе ПРАО	240
7.	Специальная астрофизическая обсерватория	340
8.	Полярный геофизический институт	330
9.	Физико-технический институт	150
	Итого	6300

Состав Научного Совета Программы Плазменные процессы в солнечной системе

Зеленый Лев Матвеевич - Председатель совета Программы, академик РАН, профессор, ИКИ

Члены Бюро Совета (представители институтов ОФН РАН)

- **Богод Владимир Михайлович** - доктор физико-математических наук, профессор, САО
- **Демехов Андрей Геннадьевич** - доктор физико-математических наук, ИПФ
- **Ермолаев Юрий Иванович** - доктор физико-математических наук, ИКИ (Научный секретарь Программы)
- **Смирнов Владимир Михайлович** - доктор физико-математических наук, ИРЭ
- **Степанов Александр Владимирович** - доктор физико-математических наук, профессор, ГАО
- **Фомичев Валерий Викторович** - доктор физико-математических наук, профессор, ИЗМИР
- **Франк Анна Глебовна** - доктор физико-математических наук, профессор, ИОФ

Члены Совета (представители других отделений РАН, ВУЗов, ведомств и стран)

- **Григорьев Виктор Михайлович** - член-корр. РАН, профессор, ИСЗФ (координатор работ СО)
- **Веселовский Игорь Станиславович** - доктор физико-математических наук, профессор, НИИЯФ МГУ (координатор работ в МГУ)
- **Кузин Сергей Вадимович** - кандидат физико-математических наук, ФИ (координатор работ ФИ РАН)
- **Сергеев Виктор Андреевич** - доктор физико-математических наук, профессор, НИИФ СПбГУ (координатор работ в СПбГУ)
- **Чашей Игорь Владимирович** - доктор физико-математических наук, ПРАО АКЦ ФИ (координатор работ ПРАО АКЦ ФИ РАН)
- **Яхнин Александр Григорьевич** - кандидат физико-математических наук, ПГИ КНЦ (координатор работ КНЦ РАН)
- **Свидский Павел Михайлович** - кандидат физико-математических наук, ИПГ ФС ГМОК (координатор работ ИПГ)
- **Петров Владимир Михайлович** - кандидат физико-математических наук, ИМБП ГНЦ РФ (координатор работ ИМБП)
- **Черемных Олег Константинович** - доктор физико-математических наук, профессор, ИКИ НАНУ-НКАУ (координатор работ на Украине)

Структура программы исследований

1. [Физические процессы во внешних областях Солнца](#), руководители **А.В. Степанов, В.М. Богод**
2. [Физические процессы в гелиосфере](#), руководитель **Ю.И. Ермолаев**
3. [Динамика магнитосфер Земли и планет](#), руководитель **А.Г. Демехов**
4. [Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы](#), руководитель **В.М. Смирнов, М.Г. Деминов**
5. [Лабораторное моделирование плазменных процессов](#), руководитель **А.Г. Франк**
6. [Применение методов нелинейной физики для исследования физических явлений в гелиосфере](#), руководитель **Л.М. Зеленый**

1. Физические процессы во внешних областях Солнца

Руководители проекта: **А.В. Степанов, В.М. Богод**

1.1. Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы

- Анализ активных плазменных структур на Солнце по данным спектрально-поляризационных радионаблюдений. (рук. Г.Б. Гельфрейх)
- Исследование условий формирования открытых и замкнутых магнитных конфигураций в активных областях Солнца по данным многооктавным поляризационным радионаблюдениям (В.М. Богод)
- Описание структуры и топологических изменений солнечных корональных стримеров и дальней области геомагнитного хвоста в рамках кинетической теории бесстолкновительной плазмы (.М.Губченко)
- Исследование квазистационарных источников солнечного ветра и анализ динамических процессов в солнечной короне по наблюдениям солнечной короны в рентгеновском и ВУФ-диапазонах спектра (С.В.Кузин)
- Топология и динамика глобальных магнитных полей Солнца, их связь с характеристиками гелиосферы. (Е. А. Гаврюсева)
- Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы (В. Н. Обридко)

1.2. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений

- Природа корональных выбросов, СКЛ и нагрев короны. (А.В. Степанов)
- МГД-моделирование структуры и динамики петельного коронального выброса массы (А. А. Соловьев)
- Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений (В.В. Зайцев)
- Механизмы генерации корональных выбросов массы и других возмущений в солнечной атмосфере, сопровождающих солнечные вспышки, (ударные волны, ускоренные частицы). (В. В. Фомичев)

2. Физические процессы в гелиосфере

Руководитель проекта: **Ю.И. Ермолаев**

2.1. Связь явлений в межпланетной плазме со структурой и динамикой солнечной короны

- режимы истечения и турбулентности солнечного ветра по данным экспериментов радиозондирования когерентными сигналами космических аппаратов (В.М. Смирнов)
- изучение динамики крупномасштабной структуры солнечного ветра (Ю.И. Ермолаев)

2.2. Динамические процессы в межпланетной плазме

- изучение быстрых вариаций параметров солнечного ветра (Г.Н. Застенкер)
- турбулентность, крупномасштабная структура и динамика солнечного ветра по радиоастрономическим данным (И.В. Чашей)

- магнитогидродинамическое рассмотрение разрывных структур в межпланетной плазме (С.А. Гриб)

2.3. Роль малых ионных составляющих, нейтральной и пылевой компонент в динамике гелиосферы

- изучение фундаментальных свойств внешней гелиосферы (В.В. Измоденов)
- мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиосфере (С.И. Попель)

2.4. Торможение и турбулизация солнечной плазмы вблизи планет и тел солнечной системы

- экспериментальное и теоретическое исследование околопланетных ударных волн (М.И. Веригин)

3. Динамика магнитосфер Земли и планет

Руководитель проекта: **А.Г.Демехов**

3.1. Передача энергии и импульса от солнечного ветра в магнитосферу

- изучение влияния на переход в режим супердиффузии внешних факторов, динамических и нелинейных эффектов и перемежаемых потоков плазмы солнечного ветра на границе земной магнитосферы (С.П. Савин).
- воздействие солнечного ветра (и солнечной активности) на магнитосферно-ионосферную систему Земли (Б.В. Козелов)

3.2. Динамика токовых слоев в хвосте и на границах магнитосферы

- исследование структуры и устойчивости токовых слоев в магнитосферах планет (Малова Х.)
- экспериментальное исследование и моделирование структуры и динамики плазменного и токового слоя магнитосферы (А.Г.Яхнин)
- экспериментальное и теоретическое исследование процессов ускорения заряженных частиц в токовом слое геомагнитного хвоста. (Григоренко Е.Е.)

3.3. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами

- исследование механизмов взаимодействия заряженных частиц плазмы с турбулентными электромагнитными полями (Л.М. Зеленый)
- экспериментальный анализ различных динамических режимов циклотронного взаимодействия волн и частиц в магнитосфере и количественное сравнение результатов эксперимента с моделями (Е.Е. Титова)
- динамика электромагнитных волн в плазме с нестационарными возмущениями параметров и потоками заряженных частиц (А.В. Костров)
- генерация, эффекты и диагностика электромагнитных полей и волн в космической плазме: теория и лабораторное моделирование (А.Г. Демехов)
- развитие теории генерации шумовых и дискретных излучений и сравнительный анализ их свойств в магнитосферах планет. Влияние коллективных эффектов на динамику энергичных частиц в магнитосферах. (А.Г. Демехов)

3.4. Динамика радиационных поясов Земли и Юпитера

- изучение механизмов генерации дециметрового радиоизлучения планеты Юпитер (В.Е. Шапошников)
- исследование формирования радиального распределения концентрации фоновой плазмы в дисках вращающихся магнитосфер планет-гигантов (С.С. Давыденко)

3.5. Генерация, распространение и взаимодействие электромагнитных излучений в магнитосферах планет, диагностика плазмы

- процессы ускорения в индуцированных магнитосферах Марса и Венеры (А.А. Скальский).

- антенные методы диагностики электромагнитных излучений в плазме солнечного ветра, в магнитосфере и ионосфере Земли (В.Е. Чугунов)
- изучение количественных моделей некоторых коллективных процессов в планетарных магнитосферах и космической плазме (П.А. Беспалов)

4. Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы

4.1. Исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра

- исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра и ультрафиолетового излучения Солнца с помощью высокостабильных сигналов радионавигационных систем на трассах СПУТНИК-СПУТНИК по данным 2002-2008 гг. (А.Г. Павельев)
- исследование влияния солнечного ветра на ионосферу Земли по данным навигационных спутниковых систем (В.М. Смирнов).
- исследование электрических полей магнитосферной конвекции с учетом активной роли ионосферы в формировании этой конвекции (М.Г. Деминов).
- исследование отклика магнитосферы и ионосферы на магнитную бурю (А. Т. Карпачев)

4.2. Исследование ионосфер планет земной группы

- исследование ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания (А. Л. Гаврик).

5. Лабораторное моделирование плазменных процессов

5.1. Лабораторное моделирование нестационарных явлений вспышечного типа и радиовсплесков

- лабораторное моделирование нестационарной динамики токовых слоев и генерации радиовсплесков (А.Г.Франк)

5.2. Моделирование динамики волн в магнитосфере и ионосфере

- экспериментальное моделирование нестационарных (вспышечных) процессов генерации электромагнитных волн в плазменном циклотронном лазере, активной средой которого является двухкомпонентная неравновесная плазма ЭЦР разряда в магнитной ловушке.(С.В.Голубев)

6. Применение методов нелинейной физики для исследования физических явлений в гелиосфере

6.1. Многомасштабные каскадные процессы в физике Солнца и солнечного ветра

- мультифрактальная диагностика физических процессов в гелиосфере (Н.Г. Макаренко)

6.2. Нелинейные структуры в магнитосфере Земли

- динамические явления саморегуляции в хвосте магнитосферы и авроральной зоне (Б.В. Козелов)