«Утверждаю»

Академик-секретарь ОФН РАН

____Академик В.А. Матвеев

« » 2011 г.

Отчет за 2010г. Программа фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе» (название программы)

Координатор программы академик РАН

_____ Л.М. Зеленый

введение

Программа Отделения Физических Наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе» (ОФН-15) объединяет ученых из 9 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 (см. Приложение 1) 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 (см. Приложение 2), 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. Приложение 3 или сайт Программы <u>http://solarwind.cosmos.ru/</u>), 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

Поставленные на 2010 год задачи исследований полностью выполнены и получены важные результаты мирового уровня. Полученные результаты опубликованы в 216 работах, из них опубликовано в зарубежных изданиях – 58, опубликовано в российских изданиях – 63, публикации в материалах конференций и сборниках – 53, находятся в печати – более 40 работ, сделано более 100 докладов на отечественных и международных конференциях. Полученные результаты кратко представлены в следующем разделе.

Основные научные результаты

В 2010 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. Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы

1.1.1. Стереоскопический анализ источников солнечного ветра (ИКИ, НИИЯФ МГУ).

На основе результатов плазменных и магнитных измерений в трех различных точках гелиосферы и телескопических наблюдений Солнца из этих точек одновременно исследованы высокоскоростные потоки (ВСП) солнечного ветра (СВ) вблизи орбиты Земли и породившие их корональные дыры (КД). Такой совместный стереоскопический анализ проведен впервые. Используются данные с космических аппаратов (КА) STEREO-А, STEREO-B, ACE и SOHO и наземные наблюдения с марта 2007 г. по май 2008 г. В этот период существовали ВСП, источниками которых были КД различной полярности, геометрии и расположения относительно гелиографического и гелиомагнитного экватора. Выявлена зависимость параметров СВ от взаимного расположения КА относительно КД и гелиосферного токового слоя, а также от гелиошироты и геометрии КД. Различие в положении КА более, чем на 5° относительно гелиосферного токового слоя в ноябре 2007 года позволило обнаружить гелиоширотный градиент скорости потоков СВ между КА STEREO-А и STEREO-В, в среднем равный 20 км/с на один градус в это время. Наблюдались также значительные изменения в потоках СВ, связанные с изменением источников ВСП СВ в течение нескольких часов или суток. Эта изменчивость затрудняет использование данных КА STEREO-B для достаточно точного прогноза свойств CB в околоземном пространстве методом простого временного сдвига с опережением за счет разницы в гелиодолготе между КА и Землей даже в минимуме солнечной активности.

И.С. Веселовский, Ю.С.Шугай. Высокоскоростные потоки солнечного ветра вблизи орбиты Земли и их источники на Солнце по стереоскопическим наблюдениям в минимуме 23-го цикла, Космические исследования Т. 48, № 1, С.33-42, 2010

1.1.2. Течение Свита-Паркера и эвакуация плазмы токового слоя (ГАО)

Проведен численный анализ модели магнитного пересоединения Паркера (Parker E.N. ApJSS, 1963, 77, 177), в которой эвакуация частично ионизированной плазмы из токового слоя обусловлена разницей газового давления внутри и снаружи последнего. На основе уравнений диссипативной магнитной гидродинамики установлено, что проводимость Спитцера не оказывает заметного влияния на скорость пересоединения магнитных силовых линий, которая определяется джоулевой диссипацией, обусловленной проводимостью Каулинга. В случае «амбиполярной диффузии» вмороженность магнитного поля в плазму нарушается, и магнитный поток не сохраняется, эвакуация плазмы из токового слоя – эффективный механизм ее охлаждения. Аннигиляция магнитных силовых линий в хромосфере Солнца может приводить к формированию толстых (~100 км) токовых слоев, что объясняет происхождение спикул и микроджетов.

Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г., Течение Свита-Паркера и эвакуация плазмы из токового слоя // Труды Пулковской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика 2010», 3–9 октября 2010 г., ГАО РАН, СПб. Стр 445-448.

1.1.3. Свойства магнитных биполей в солнечном цикле (ГАО)

По данным наблюдений магнитного поля Солнца на телескопах KPVT за период 1975-2002 гг. и SOHO/MDI за период 1996-2009 гг. выделены и изучены свойства магнитных биполей в солнечном цикле. В частности подтверждено, что первые биполи нового цикла появляются в высокоширотных областях на широтах 50-60° за несколько лет до минимума активности в эпоху завершения магнитной переполюсовки Солнца на полюсах. Выделяются два широтных дрейфа биполей в каждом полушарии, один в направление полюсов, другой в направление экватора, впоследствии совпадающего с областью существования солнечных пятен. Установлены изменения углов наклона ориентации биполей от фазы цикла, широты и интенсивности магнитного поля.

Показано, что биполи малого размера (эфемерные области) имеют отличный от солнечных пятен наклон магнитной оси – их хвостовые области расположены ближе к экватору. На основании этого делается вывод о разной области генерации солнечных пятен и эфемерных областей (Puc.1).



Рис.1. Изменение преимущественного угла наклона магнитной оси биполей от широты для биполей активных областей (черные квадратики) и эфемерных областей (кружки).

Tlatov, A. G.; Vasil'eva, V V.; Pevtsov, A A., Distribution of Magnetic Bipoles on the Sun over Three Solar Cycles, The Astrophysical Journal, 717, pp. 357-362, 2010.

1.1.4. Долговременные изменения глобального магнитного поля Солнца по данным наблюдений структуры короны в минимумах активности (ГАО)

Исследована форма короны в минимумах активности по данным наблюдений солнечных затмений за 130 лет и положение корональных лучей по данным ежедневных наблюдений К-коронографов за последние 3 цикла активности. Установлено, что крупномасштабная структура короны меняется на вековой шкале времени и в 11-летнем цикле и определяется вариациями глобального магнитного поля Солнца. В частности в середине 20-го века корона наиболее близко соответствовала дипольной конфигурации. В конце 19-го и начале 21-го века структура корона больше соответствовала квадрупольной конфигурации глобального магнитного поля. В эпоху минимума активности корональные стримеры наиболее сильно отклонены от радиального направления, а углы отклонения связаны с конфигурацией гелиосферного нейтрального слоя Рис. 1. Установлены связи между вариациями формы короны и геомагнитными возмущениями в эпоху минимума активности. Вариация формы короны имеют близкий период и предшествует циклу Глайсберга для солнечной активности.



Рис. 1. Изменение параметра "сплюснутости" короны в период 1878-2008 гг. Проведена огибающая линия.

Tlatov, A. G. The Non-radial Propagation of Coronal Streamers within a Solar Cycle, The Astrophysical Journal, 714, pp. 805-809, 2010

Tlatov A. G., The centenary variations in the solar corona shape in accordance with the observations during the minimal activity epoch, Astronomy and Astrophysics; V.522, A27, 2010.

Tlatov, A. G.; Vasil'eva, V. V. The non-radial propagation of coronal streamers in minimum activity epoch, Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, V. 264, p. 292-294, 2010

1.1.5. МГД-моделирование магнитного шара в однородном поле тяжести (ГАО)

решение Чандрасекхара-Прендергаста Известное магнитостатическое (1956)для сферического вихря с осевой симметрией. обжимаемого магнитного снаружи потенциальным магнитным полем, представляет значительный интерес как для описания магнитного поля звезды в целом, так и для моделирования солнечных вспышек. Данное решение обобщено с учетом действия однородного гравитационного поля. В отличие от модели Ч-П, в новом решении появляется зависимость плотности плазмы в шаре от магнитного потока. значительно расширяет класс анализируемых что магнитоплазменных равновесий и позволяет предложить новые сценарии вспышечного энерговыделения.

Форма магнитных силовых линий в меридиональном (полоидальном) разрезе для бессилового магнитного шара и для шара с градиентами давления и плотности газа внутри представлена на рис.1 и 2, 3 соответственно. Внешнее потенциальное поле, «обтекающее шар» и вдали от шара принимающее форму однородного поля, параллельного оси симметрии шара, на рисунках не показано, как не показано и азимутальное магнитное поле в шаре - B_i , силовые линии которого кольцеобразно охватывают ось симметрии O_z .



Рис.1. Меридиональный разрез фигуры вращения, показана форма магнитных поверхностей (A = const) B_z и B_r -полей. Изображены бессиловые (fff), b = d = f = 0, шары для трех значений радиуса



Рис. 2. Геометрия полоидального поля шара при одном значении $q_{0,1} \equiv aR_1 = 6.988$ из числового ряда (24), но различных $I = C_2/C_1$: $I_1 = -2$ (*a*), $I_2 = -7$ (*b*), $I_3 = -500$ (*c*).



Рис.3. Аналогичная картина при $q_{0,3} \equiv aR_3 = 10.4171$ и $l_1 = 7$ (*a*), $l_2 = 70$ (*b*), $l_3 = 300$ (*c*)

Проведенные расчеты позволили получить распределений давления, плотности и температуры в магнитном шаре-паучке при широком наборе значений параметров.

1.1.6. МГД-моделирование корональных стримеров (ГАО)

В настоящей работе: 1. Приведено решение обратной МГС задачи для систем с осевой симметрией: даны в явной форме выражения для давления и плотности плазмы, позволяющие рассчитать с учетом силы тяжести пространственные распределения этих величин по заданной геометрической структуре магнитного поля; 2. Предложена новая, значительно более простая, чем в [5], аналитическая формула для описания шлемовидных (касповых) магнитных структур со стримерами, исходящими из центра; 3. Рассчитана численная модель, дающая физические распределения давления, плотности и температуры в стримере, близкие к наблюдаемым.



Рис. 1. Магнитная структура сильно вытянутого коронального волокна-стримера в меридиональном разрезе, Овалом показано положение нейтральной точки – основание стримера.



Рис 2. а, б, в. Показано в 2-х проекциях распределение температуры (а, б) в миллионах К и плотности (в) в единицах плотности внешней среды на этой высоте: $r(r, z)(r_0(z))^{-1}$.

При анализе картинок следует вообразить фигуру вращения вокруг оси z, здесь дан только меридиональный разрез этой фигуры при некотором угле j. Размер в радиальном направлении (1 единица) значительно отличается от вертикального размера (25 единиц). В одной единице – 50 000 км. Температура достигает высоких значений (>3 МК) в области нейтральной гиперболической точки (овал на рис.1), где встречаются поля противоположного направления. Здесь возможно спонтанное пересоединение магнитных силовых линий и соответствующее энерговыделение. На более высоких уровнях температура волокна больше корональной T, равной 2 МК, а на высоте около 20 единиц (1 млн км над фотосферой) температура на осевой линии волокна сравнивается с корональной. В цилиндрической оболочке, окружающей волокно, T несколько ниже. Вокруг волокна, на оси которого плотность примерно в 1.5 раза выше корональной, имеется цилиндрическая оболочка с пониженной плотностью плазмы. Это создает фон низкой интенсивности, на котором волокно хорошо выделяется.

Публикации по проектам 1.1.5. и 1.1.6.

1. Efremov V.I., Parfinenko L.D. Solov'ev A.A. Solar Phys. 267. 273-293 (2010)

2. Соловьев А.А. Строение солнечных волокон. Астрономический Журнал, том. 87, №1. с. 93-102. (2010)

3. A.A. Solov'ev and E.A. Kirichek. Twisted magnetic tubes (ropes) and coronal mass ejections. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) Proceedings of 2-nd Symposium "Solar Wind-Space Environment Interaction". December 4-8, 2009, Cairo, Egypt - L. Dame and A. Hady (eds). Cairo University Press, pp. 27-32 (2010).

4. А.А.Соловьев Магнитогидростатические конфигурации в космической плазме. Труды 39-й Международной студенческой научной конференции «Физика Космоса» 1-5 февраля 2010 г. Изд-во Уральского ГУ, ,стр.149-150. (2010).

4. Соловьев А.А., Тимошин А.А. Обратная магнитогидростатическая задача и моделирование спокойных солнечных протуберанцев. //Физический вестник. Выпуск 4. Сборник научных статей. – С-Пб., РГПУ им. А.И. Герцена.С. 95-100. (2010)

5.Соловьев А.А., Алексашин К.Г. Тонкая структура и поперечная асимметрия солнечных волокон. //Физический вестник. Выпуск 4. Сборник научных статей. –СПб., РГПУ им. А.И. Герцена.. С.100-105. (2010)

7.Соловьев А.А. Динамика скрученных магнитных силовых трубок (жгутов) и вспышечное пересоединение в э тих структурах. Труды 13-й Пулковской конференции. ГАО РАН, 3-8 Октября, стр 399-404. (2010)

8.Соловьев А.А., Киричек Е.А. Магнитный Шар В Однородном Поле Сил Тяжести, Труды 13-й Пулковской конференции. ГАО РАН, 3-8 Октября, , стр 405-408. (2010)

9.Соловьев А.А., Киричек Е.А. Моделирование корональных стримеров, Труды 13-й Пулковской конференции. ГАО РАН, 3-8 Октября, стр 409. (2010),

10. Мангаева Г.А., Михаляев Б.Б., Соловьев А.А. Спиральные Структуры в Корональных Аркадах. Труды 13й Пулковской конференции. ГАО РАН, 3-8 Октября, стр.249-252 (2010)

1.1.7. Классификация электродинамических свойств плотной бесстолкновительной слабозамагниченной анизотропной движущейся плазмы высокого давления на основе данных о форме функции распределения ее частиц (ИПФ)

В рамках уравнений Власова и Максвелла рассмотрено формирование крупномасштабных э.м. структур в движущейся токонесущей анизотропной горячей бесстолкновительной плазме высокого давления по параметру магнитного давления β , определяемой критериями слабой замагниченности $\kappa_D \beta >> 1$, $\kappa_G \beta >> 1$ (Рис. 1). Скорости потоков меньше тепловой электронной. Параметры анизотропии потока по «энергии» κ_D и по «импульсу» κ_G вычисляются по форме функции распределения частиц. Отношение этих параметров - «добротность» G, характеризует электромагнитные свойства плазмы и выражается через отношение плотности возбуждаемых диамагнитных и резистивных токов, либо через отношение аномального и диамагнитного масштабов плазмы индуцированных анизотропией. При этом показано, что реализуются три характерных

состояния плазмы: резистивное состояние 0 < G <<1, диамагнитное состояние /1/G/<<1 и квазибестоковое состояние $G \approx -1$.



Рис. 1: Структуры формируемые в области разлета разлета слабозамагниченной плазмы на примере солнечной короны. Выделено состояние «максимума» (слева) и состояние «минимума» со стримерным поясом (справа). Поведение структур определяется параметром, меняющимся в широком диапазоне положительных и отрицательных значений

1). Рассмотрено состояние 0 < G << 1, когда поток плазмы, имеющей изотропную функцию распределения, взаимодействует с распределенной намагниченностью. Получены выражения для параметров анизотропии, найдены трехмерные структуры полей в хвосте-следе. показана возможность топологической перестройки в компактное диамагнитное состояние при значениях параметра 1/G << 1. Топологическая перестройка происходит при значении параметра $G \approx 1$.

2). Рассмотрено состояние /1/G/<<1, когда поток плазмы имеет изотропную функцию распределения и в него погружен стационарный диамагнитный токовый слой, характеризуемый анизотропным распределением по скоростям. Вычислен обобщенный параметр анизотропии, показана возможность возбуждения трех типов диамагнитных структур.

3). Рассмотрено состояние $G^{\approx -1}$, которое реализуется при нелинейной динамике анизотропной плазмы в квазибестоковом режиме, в котором происходит взаимная компенсация плотности тока диамагнитным и резистивным токами. Режим реализуются в длинноволновом пределе в плазме с анизотропной функцией распределения.

Параметр G по своему влиянию на топологию возбуждаемых электромагнитных полей подобен числу Маха M , влияющего на топологию возбуждаемых акустических полей.

- Губченко В.М. О кинетическом описании крупномасштабных токонесущих электромагнитных структур, возбуждаемых в движущейся горячей бесстолкновительной плазме // Труды конференции «XII Харитоновские чтения - Международная научная конференция по проблемам физики высоких плотностей энергии», РФЯЦ г. Саров, 19-23 апреля 2010 года (в печати).
- Губченко В.М. Об управлении электромагнитным взаимодействием замагниченного тела с гиперзвуковым потоком разреженной горячей плазмы изменением формы распределения её частиц по скоростям // Proc. of the 9th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, April 13-15, 2010, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia.
- Губченко В.М., Смирнов А.В. О новом параметре, управляющем электромагнитным взаимодействием замагниченного тела с набегающим гиперзвуковым потоком. Не МГД анализ // Proc. of the 8th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, March 31—April 2, 2009, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia, pp. 100-103.
- Gubchenko V.M. Planetary magnetospheres formed by flows of hot collisionless dense plasma and kinetic plasma parameters governing topology reconfiguration // EPSC Abstracts. 2010. V. 5, EPSC2010-656 (European Planetary Science Congress 2010, Roma, Italy, 19-25 September 2010).

1.1.8. Анализ спектров солнечного рентгеновского излучения (ИЗМИРАН)

На основе анализа спектров солнечного рентгеновского непрерывного излучения в диапазоне 3.495-4.220А, полученных прибором РЕСИК на спутнике КОРОНАС-Ф, определены истинные потоки солнечного рентгеновского непрерывного излучения для 19 солнечных вспышек (период 2002-2003 гг.), что позволило установить различия в содержании химических элементов в фотосфере и короне, а также определить содержание в солнечной короне редких элементов - аргона и калия.



Рис.1. Примеры отдельных линий и непрерывного спектра, полученных прибором РЕСИК на спутнике КОРОНАС-Ф

J.Sylwester, B.Sylwester, J. H.Phillips, V.D.Kuznetsov. Highly Ionized Potassium Lines in Solar X-ray Spectra and the Abundance of Potassium. Astrophys. J.,**710**, 804-809, 2010.

doi: 10.1088/0004-637X/710/1/804

K.J.H.Phillips, J.Sylwester, B.Sylwester, V.D.Kuznetsov. The solar X-ray continuum measured by RESIK. Astrophys. J., **711**, Issue 1, pp. 179-184, 2010.

DOI: 10.1088/0004-637X/711/1/179

J.Sylwester, B.Sylwester, K.H.Phillips, V.D.Kuznetsov. A Solar spectroscopic absolute abundance of argon from RESIK. Astrophys.J., **720**, 1721-1726, 2010.

1.1.9. Модернизации солнечного вектор магнитографа ИЗМИРАН (ИЗМИРАН)

Завершена работа по модернизации солнечного вектор магнитографа ИЗМИРАН, который сегодня представляет собой спектромагнитограф, т.е. прибор, позволяющий определять магнитное поле, поле скоростей, температуру и, возможно, другие параметры солнечной по плазмы по профилям параметров Стокса в окрестности одной или нескольких магнитоактивных линий. В использованной схеме анализатор поляризации не требует питания и не содержит ни одной движущейся части, чем выгодно отличается от аналогичного элемента спектрополяриметра, работающего на спутнике Hinode, где вместо расщепителя используется вращающаяся пластина. При этом теоретическое СКО единичного измерения малого продольного поля, соответствующее СКО параметров Стокса $2 \cdot 10^{-3}$ (которое обычно реализуется при выдержке 0.5 сек и ширине входной щели спектрографа 1.2"), составляет 4Гс, а теоретическая чувствительность к поперечному полю составляет 120Гс. Оценки точности измерений по повторяемости соответствуют теоретическим оценкам



Рис.1. Сравнение измерений слабого магнитного поля с интервалом 3.5 минут. Диапазон от -10 до 10 Гс. Чувствительность около 2 Гс.

1.1.10. Анализ структуры корональных дыр и их связи с характеристиками солнечного ветра (ИЗМИРАН)

Выполнен цикл работ по анализу структуры корональных дыр и их связи с характеристиками солнечного ветра. Показано, что корональные дыры во многом аналогичны по своей структуре солнечным пятнам и играют в короне ту же организующую роль как и пятна в фотосфере. Солнечный ветер формируется в корональных дырах на относительно малых высотах. При этом контраст корональных дыр, в той же мере как их площадь, определяет скорость связанных с ними потоков солнечного ветра.Это связывает непосредственно наблюдаемые величины и может быть использовано в краткосрочном прогнозе геофизических возмущений.



Рис.1. Силовые линии на западном лимбе 10 марта 2001 года, когда корональная дыра вышла на лимб. Видна радиальная структура в центре КД и расходящиеся силовые линии на периферии.



Рис.2. Сравнение фотометрической и магнитной структур КД. Наиболее темная часть КД напоминает тень, внешние ее части напоминают полутень.

1.1.11. Анализ долготного распределения квадрата магнитного поля Солнца <B²> по магнитограммам SOHO/MDI (ИЗМИРАН)

По магнитограммам SOHO/MDI анализировалось долготное распределение квадрата магнитного поля Солнца $\langle B^2 \rangle$. в 23-м солнечном цикле. Показано, что энергия магнитного поля ($\langle B^2 \rangle$) меняется с долготой. Однако структура этих вариаций, скорее всего, не укладывается в схему активных долгот. Во время высокой активности на всех широтах наблюдается явная связь между долготными вариациями для умеренно сильных (|B| > 50 Гс или |B| > 100 Гс) и относительно слабых ($|B| \le 50$ G или $|B| \le 100$ G) полей. Вне фазы сильной активности СЦ также наблюдается связь между долготными вариациями для умеренно сильных и относительно слабых полей, но преимущественно на широтах не превышающих $\approx 30^{\circ}$. Для фоновых полей на уровне $|B| \le 25$ Гс также существуют долготные вариации, но они не связаны с вариациями для сильных полей. В связи с этим кажется справедливым заключение, что поля солнечной активности - лишь вкрапления в общее поле, а не его источник.

1.1.12. Исследование широтного распределения пятен и его асимметрия (ИЗМИРАН)

На ряде данных о широтах групп пятен за 1876-2009 продолжено рассмотрение широтного распределения центров пятнообразования и его северо-южная асимметрия. Рассматриваются три основные различные характеристики широтного распределения пятен и его асимметрия: а) "Ненормированная" асимметрия (разность между абсолютными значениями широт групп пятен в северном и южном полушариях). Знак этой величины совпадает со знаком широт того полушария, в котором центр пятнообразования расположен в более высоких широтах. б) Сумма абсолютных значений широт пятен в двух полушариях. Эта величина показывает "размах крыльев бабочки", т.е. расстояние между центрами пятнообразования в северном и южном полушариях; в) "нормированная" асимметрия, показывающая положение центра пятнообразования относительно "размаха крыльев" бабочки. Особый интерес представляет рассмотрение абсолютных значений нормированной и ненормированной северо-южной асимметрии широтного распределения групп пятен. Эти величины достигают максимальных значений в минимуме цикла активности – тогда же, когда и как абсолютная асимметрия площадей и числа пятен. Оказалось, что максимальные значения абсолютных значений широтной асимметрии коррелируют с максимальными значениями асимметрии площадей пятен (в минимумах циклов активности), коэффициент корреляции составляет 0.68. В то же время, чем больше абсолютная асимметрия площадей пятен в минимуме цикла активности, тем ближе в этом цикле сходятся крылья бабочки. Эти факты указывают на единый механизм возникновения северо-южной асимметрии, при котором проявляется как разбалансировка полушарий по мощности (асимметрия площадей пятен), так и по пространству (асимметрия широтного положения центров пятнообразования).

1.1.13. Анализ вариация структуры солнечного пятна (ИЗМИРАН)

Рассмотрена вариация структуры солнечного пятна, то есть изменение со временем относительной доли тени внутри пятна $q=A_U/A_P$, где A_U и A_P -площади тени и всего пятна соответственно. Выяснилось, что это отношение имеет вековой тренд с максимумом в 30-х годах XX века. В это же время минимальным оказалось число пятен, не имеющих тени. Дальнейшее исследование показало, что наблюдаемый вековой тренд в основном связан с малыми пятнами, площадью до 200 м.д.п. Отношение тени пятна к его площади можно представить линейной зависимостью $A_U/A_P = a_0+a_1A_p$. Рассмотрение временных зависимостей коэффициентов a_0 и a_1 для пятен различной площади показало, что равнение регрессии для пятен с площадью меньше 300 м.д.п. коэффициенты a_0 и a_1 связаны

соотношением у = 0,171 – 207,3 х. Для пятен больше 300 м.д.п. связь межу a_0 и a_1 практически исчезает. Полученные результаты показывают, что связь между q и S определяется одним параметром a_1 ($a_0 \approx \text{const}$). Этот параметр постепенно убывает с ростом площади Sp и устанавливается универсальное значение $a_0 \approx 0,18$, в более полном виде $a_0 = (0,18\pm0,05)+a_1(S)(S-200)$. Это соответствует значению, выведенному М.Вальдмайером для отношения радиусов тени и всего пятна $R_U/R_P=0.42$, что дает среднее $q=A_U/A_P=0.18$.

1.1.14. Связь быстрых потоков солнечного ветра с корональными дырами (ИЗМИРАН)

Показано, что пространственно дискретные высокоскоростные потоки солнечного ветра с предельными скоростями 700-800 км/с, наблюдающиеся в эпохи высокой активности Солнца на любых гелиоширотах всегда ассоциируются с рекуррентными корональными дырами, которые, в свою очередь, локализуются областях с минимальным значением индекса солнечной активности F10.7(t). Такие униполярные области формируются из периферических частей двух или большего числа АО, обращенных друг к другу одноименными полярностями, в окрестностях линии раздела между ними.

1.1.15. Анализ инверсии знака спиральности (ИЗМИРАН)

На статистически значимом наблюдателном материале по данным Пекинской обсерватории обнаружены регулярные инверсии знака спиральности в определенные фазы роста и спада солнечного цикла. До обнаружения этих фаз ранее существовали неоднозначные толкования вышеописанного полушарного правила. Замечено возможное опережение по времени (порядка 2 лет) цикла спиральности по отношению к циклу пятен. Также замечено существенное ослабление спиральности противоположного знака (в фазе инверсии знака) в северном полушарии в конце 23-го цикла

1.1.16. Анализ данных о мягком рентгеновском спектре миссии YOHKOH (ИЗМИРАН)

По материалам миссии ҮОНКОН обработаны данные по излучению в мягком рентгеновском спектре. Изучено распределение направления закрученности магнитных (хиральность). Установлено, что таких структур структур ряд связаны с крупномасштабным магнитным полем, они существуют над атмосферой Солнца длительное время. Формирование этих структур согласуется с выносом спиральности из нижней атмосферы. Статистическая обработка наблюдательного материала по этим закрученным структурам доказывает, что знак спиральности крупномасштабного магнитного поля противоположен установленному ранее полушарному правилу для спиральности мелкомасштабных магнитных полей в активных областях в обоих полушариях в течение солнечного цикла.

Список работ ИЗМИРАН по разделам 1.1.9-1.1.16

Руденчик Е.А., Кожеватов И.Е., Новая версия спектромагнитографа ИЗМИРАН- Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2010», Санкт-Петербург, ГАО, Пулково, 3-9 октября 2010, стр.367-371

V.N.Obridko, B.D.Shelting. Relationship between the Parameters of Coronal Holes and High-Speed Solar Wind Streams over an Activity Cycle (Solar Phys, in press)

Вadalyan O.G. "Two Types of Differential Rotation of the Solar Corona" New Astronomy, 2010, v. 15, pp. 135-143 Э.И. Могилевский, К.И. Никольская. Высокоскоростные потоки стационарного солнечного ветра и возможный механизм их генерации. Геомагнетизм и Аэрономия. 2010. т.50, № 2, с.159-166.

K.I. Nikolskaya. Regions on the Sun responsible for the high speed streams of the steady solar wind. In Proceedings of 8th International Conference :Problems of Geocosmos", St.Petersburg StateUniversity, Petrodvorets, 20-24 Sept. 2010. p.193-198, 2010.

Hongqi Zhang, T. Sakurai, A. Pevtsov, Yu Gao, Haiqing Xu, D. D. Sokoloff, K. Kuzanyan "New dynamo pattern revealed by solar helical magnetic fields", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 402, Issue 1, pp. L30-L33 (2010)

Hongqi Zhang, Shangbin Yang, Yu Gao, Jiangtao Su, D.D. Sokoloff, K. Kuzanyan "Large Scale Soft X-ray Loops And Their Magnetic Chirality In Both Hemispheres", The Astrophysical Journal, Volume 719, Issue 2, pp. 1955-1963 (2010)

1.1.17. Наблюдения Солнца в мягком рентгене на спутнике КОРОНАС-Фотон (ФИАН)

В эксперименте ТЕСИС/КОРОНАС-Фотон эти исследования в диапазоне 0.8-10 Å проводились с помощью блока SphinX, разработанного совместно Центром Космических Исследований Польской Академии Наук и ФИАН . Прибор оснащен 3-мя датчиками на pin-диодах, имеющих разную эффективную площадь от 20 мм² до 0.08 мм², что позволяет регистрировать изменение интенсивности в диапазоне более 7 порядков.

Важным результатом наблюдений аппаратуры SphinX явились данные о рентгеновской активности Солнца в период глубокого минимума солнечной активности [1]. Уровень интегрального потока рентгеновского излучения был чрезвычайно низок, особенно в феврале, марте и августе 2009 года: поток на орбите Земли составлял 5×10^{-10} Вт/м². Таким образом, минимум 24 цикла активности может считаться самым глубоким из последних 4-х, с начала космических исследований Солнца. По полученным данным, средняя интенсивность рентгеновского излучения в этот период составляет 1.3×10^{18} Вт. Сравнивая полученный результат с данными рентгеновской светимости звезд, полученных в ходе эксперимента ROSAT, Солнце можно определить как звезду с наиболее слабым рентгеновским излучением в сфере радиусом 23 световых года. Ее светимость в MP диапазоне примерно в 100 раз меньше, чем Альфа Центавра, которая считается «двойником» Солнца на основе схожести их оптических характеристик.

Анализ данных аппаратуры SphinX, полученных в периоды наименьшей солнечной активности, показал, что даже в такие периоды на Солнце происходит множество событий с временными профилями, подобными вспышечным. Локализация этих событий на диске Солнца была возможна благодаря одновременным наблюдениям с помощью спектрогелиометра MgXII (регистрировал плазму с температурой не менее 5 MK) и телескопа на спектральный диапазон 132 А, где находятся интенсивные линии ионов FeXX и FeXXIII с температурой более 12 млн. град (рис. 2). При этом ход интенсивности в линии MgXII хорошо корелировался с интегральной интенсивностью рентгеновского излучения, регистрируемого прибором SphinX [2].



Рис. 1. Изображение горячей плазменной структуры в короне в линиях MgXII (слева) и FeXX-XXII (справа), зарегистрированной 26 марта 2009 года.

С. В. Кузин, С. А. Богачев, И. А. Житник, С. В. Шестов, В. А. Слемзин, А. В. Митрофанов, Н. К. Суходрев, А. А. Перцов, А. П. Игнатьев, О. И. Бугаенко, Ю. С. Иванов, А. А. Рева, М. С. Зыков, А. С. Ульянов, С. Н. Опарин, А. Л. Гончаров, Т. А. Шергина, А. М. Урнов, В. А. Соловьев, С. Г. Попова. Эксперимент ТЕСИС по рентгеновской изображающей спектроскопии солнца на спутнике КОРОНАС-ФОТОН. Известия РАН. Серия физическая, 2010, том 74, № 1, с. 39–43

J. Sylwester, M. Kowalinski, Sz. Gburek, M. Siarkowski, S. Kuzin et al. The Sun's X-ray emission during the recent solar minimum / // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2010. V. 91, № 8. P. 73-74.

1.1.18. Радиоисточники со сменой знака поляризации во вспышечных активных областях и их моделирование (САО)

На РАТАН-600 с помощью широкодиапазонного спектрально-поляризационного комплекса с высоким спектральным разрешением, при исследовании активных областей, производящих мощные вспышки, были обнаружены источники с необычными спектральными особенностями в виде резкого уменьшения интенсивности поляризованного излучения в различных частях регистрируемого частотного диапазона (2-16 ГГц), иногда переходящие в смену знака поляризации.

Рассмотрены спектры солнечных вспышечно-активных областей с особенностями поляризованного радиоизлучения, зарегистрированные на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 2–16 ГГц. Необычным является существенное понижение поляризованного излучения (параметр Стокса V) в средней части микроволнового диапазона (6-12 ГГц) иногда с изменением знака поляризации. В ряде случаев имеет место и преобладание обыкновенного излучения в длинноволновой части микроволнового диапазона. В рамках простейших моделей петли в виде горячего и холодного торов проведены расчеты ожидаемых особенностей частотной структуры источников микроволнового излучения. Численные расчеты спектров позволили установить, что указанные особенности поляризованного излучения могут быть объяснены наличием горячей области в короне Солнца. Эти особенности интерпретируются в рамках модели с горячей корональной магнитной петлей. Расчеты подтверждают хорошее качественное соответствие рассчитанных и наблюдаемых спектров поляризованного и неполяризованного излучения. Неглубокая двойная инверсия поляризации в области минимума поляризованного излучения в раках рассмотренной модели могла бы быть связана с уменьшением корональной температуры с высотой. Детали полученных спектров показывают, каким образом при наличии полной информации о спектре и поляризации микроволнового излучения источника можно было бы вести диагностику физических условий в корональной петле. Для ряда активных областей получены такие параметры горячей области в источнике излучения, как напряженность магнитного поля (360–450 Гс) и произведение градиента магнитного поля на размер этой области (0.26–0.63). Показано, что на этих характеристиках в силу незначительных поперечных размеров петли существенно не сказывается модель магнитного поля. В рамках модели тора на этих характеристиках существенно не сказывается и недостаточная разрешающая способность радиотелескопа РАТАН-600, так как излучение горячей области одинаково при разных расстояниях от центра области. Однако, конечно, при более сложных моделях магнитного поля интегральные характеристики радиоизлучения горячей петли могут заметно отличаться от характеристик радиоизлучения горячей петли, задаваемой в виде тора.

Богод В.М., Кальтман Т.И., Ясновым Л.В. "Особенности поляризованного радиоизлучения активных областей на Солнце." АЖ, 2010. т.87, №11, с.1-9.

1.1.19. Расчет радиоизлучения активных областей на основе реконструированного магнитного поля и сравнение с данными наблюдений на РАТАН-600 (САО)

В работе исследуются корональные магнитные поля солнечных активных областей по экстраполяции фотосферных данных, расчетам циклотронного излучения и по

наблюдениям на РАТАН-600. Описана методика реконструкции магнитного поля в корональной области по экстраполяции фотосферных наблюдений магнитного поля на основе бессилового нелинейного приближения. Магнитные поля восстанавливаются на основе данных, полученных со спутника SOHO (инструмент MDI). Исходя из реконструированного магнитного поля и упрощенных трехмерного модельных распределений электронной концентрации и кинетической температуры, рассчитывается тепловое магнитотормозное излучение активной области. Для расчета радиоизлучения используются полные формулы для коэффициентов циклотронного поглощения на 2 – 5 гармониках гирочастоты для обыкновенной и необыкновенных мод излучения. Авторами разработаны компьютерные программы для восстановления магнитных полей и расчетов радиоизлучения, соответствующие описанным методикам. Расчетная пространственная и спектральная структура радиоизлучения сопоставляется с данными спектральнополяризационных наблюдений с высоким пространственным разрешением на РАТАН-600. Анализируются возможные причины изменений пространственного распределения и поляризационных характеристик излучения, связанных с процессом распространения радиоволн при наличии в активных областях различного типа неоднородностей, токовых слоев и сложной топологии магнитного поля.

Богод В. М., Кальтман, Т. И., Ступишин А. Г., Яснов Л. В. "Расчет радиоизлучения активных областей на основе реконструированного магнитного поля и сравнение с данными наблюдений на РАТАН-600" Доклад на конференции ВАК-2010

1.1.20. Исследование высотной структуры магнитного поля во вспышечно-активной области с использованием многоволновых радио наблюдений (САО)

Проведен анализ высотной структуры активной области NOAA 10956 по многоволновым наблюдениям ее радиоизлучения. Активная область NOAA 10956 состояла из нескольких циклотронных источников поляризованного излучения A, B, C, D и радиоисточника над нейтральной линией магнитного поля (NLS). Показано, что использование высокоточных многоволновых наблюдений позволяет определить не только зависимость магнитного поля от высоты, но и определить соотношение высотных структур излучающей области для всех ее компонентов. Наблюдения проводились на радиоителескопе РАТАН-600 в период с 16 по 22 мая 2007 г в нескольких азимутах. Применение метода многоволновой стереоскопии позволило измерить и сопоставить высоты различных радиоисточников. Измерены характеристики собственного движения радиоисточников в активной области NOAA 10956 и проведена реконструкция магнитного поля, которая сопоставлена с результатами высотных измерений. Обнаружено наличие быстропеременной мелкомасштабной и более стабильной крупномасштабной высотных магнитных структур в активной области и их изменения во времени в течение нескольких дней.

Показано, что измеренная структура магнитного поля дает более точные тенденции ее изменения с высотой, чем в реконструированных магнитного поля, а высота радиоисточника NLS расположена ниже высоты циклотронных источников на 1-2 Мм.

использованием многоволновых радио наблюдений", сборник трудов конференции «Солнечная и солнечноземная физика - 2010», Санкт-Петербург в печати.

Bogod V.M., Stupishin A.G., and Yasnov L.V. ON Measuring the Height of the Magnetic Field Structure in Active Regions and Comparison with Model Reconstructions. Presented to Solar Physics, 2010.

Кальтман Т. И. "О соотношении вкладов гармоник гирочастоты для циклотронного излучения пятенного источника", сборник трудов конференции «Солнечная и солнечно-земная физика - 2010», Санкт-Петербург в печати.

Богод В. М., Ступишин А. Г., Яснов Л. В "Исследование высотной структуры активной области с

Богод В.М.(1), Ступишин А.Г.(2), Яснов Л.В.(2) О высотной структуре магнитных полей по многоволновым поляризационным наблюдениям на РАТАН-600 Доклад на конференции ВАК-2010

1.1.21. О создании многооктавного спектрально-поляризационного приемного комплекса для исследований солнечного радиоизлучения на РАТАН-600 (САО)

Завершено многооктавное перекрытие частотного диапазона РАТАН-600 с помощью комплекса с параллельным анализом спектра. Исследуемый микроволновый диапазон перекрыт по частоте от 0.75 ГГц до 18.2 ГГц с частотным разрешением 1%, что в сочетании с большой эффективной площадью крупного радиотелескопа РАТАН-600 предоставляет новые возможности для исследования тонкой структуры радиоизлучения солнечной короны. Реализована регистрация мгновенного спектра во всем частотном диапазоне (рис.1 и 2). Регулярные наблюдения Солнца проходят автоматическую обработку и выставляются в сети ИНТЕРНЕТ на сайте <u>http://www.spbf.sao.ru/prognoz/</u> в оперативном режиме через 4 минуты.



Рис.1 Расположение частот многооктавного приемного комплекса по спектру 0.75 ГГц-18.2 ГГц.





Рис.2 Вверху- пример регистрации широкодиапазонного спектра Солнца со слабой активностью. Внизупример спектра для Солнца со вспышечно-активной областью.

Тохчукова С.Х. Информационная система наблюдений Солнца на РАТАН-600. 2010, Представлено в Астрофизический бюллетень:

Богод В.М., Алесин А.М., Перваков А.А.: СПКВР - многооктавный спектрально-поляризационный комплекс высокого разрешения для исследований Солнца на РАТАН-600. 2010, Астрофизический бюллетень (принято в печать)

Богод В.М., Тохчукова С.Х. Многооктавный спектрально-поляризационный комплекс для исследований микроволнового излучения солнечной атмосферы на РАТАН-600. журнал СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА. 2010, ВЫП. 16. СТР 45–48

Богод В.М., Многооктавный спектрально-поляризационный комплекс для исследований микроволнового излучения солнечной атмосферы на РАТАН-600 конференция "Солнечно-земная физика" 2010 г. Иркутск, 28-30 июня

Богод В.М., Алесин А.М., Балдин С.В., Перваков А.А., Тохчукова С.Х. Многооктавные наблюдения поляризованного излучения солнечной атмосферы с высоким спектральным разрешением на РАТАН-600, Доклад на конференции ВАК-2010

1.2. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений

1.2.1. Наблюдения процессов ускорения электронов и нагрева плазмы в солнечных вспышках (ИКИ)

Рассматривались временные профили эффективной температуры вспышечной плазмы, вычисленной по интенсивности мягкого рентгеновского излучения, в событиях балла GOES >X1 в 1997-2006 годах. По времени роста температуры до максимума эти события были разделены на две группы спектром - <10 мин (импульсные) и >10 мин (длительные). В каждой группе обнаружено подобие временных профилей температуры, которое связано с нагревом плазмы ускоренными электронами с переменным энергетическим спектром. Длительные события представляют собой перекрывающиеся между собой импульсные события, которые инициируются несколькими последовательно поднимающимися волокнами.

В шести длительных событиях, которые сопровождались солнечными протонными событиями, выбор начала развития события (0 мин), исходя из подобия временных профилей температуры, показывает, что ускорение электронов с наиболее жестким спектром происходило после 10 мин на фазе спада температуры, а протоны 100 МэВ выходили в межпланетное пространство примерно на 25 минуте в момент отрыва коронального выброса массы, что обеспечивало одновременный приход первых протонов на 35 минуте.

Струминский А.Б., Источник солнечных протонов: температура вспышечной плазмы и моменты инжекции, Известия РАН, серия физическая, принято в печать, 2011.

Струминский А.Б., Наблюдения радиоизлучения на частоте 245 МГц как индикатор нового режима ускорения электронов и нагрева плазмы, Труды Всероссийской конференции по солнечной и солнечноземной физике, ГАО РАН, Пулково, 2010.

1.2.2. Изучение гармонических осцилляций в темпах счета рентгеновских детекторов космического аппарата RHESSI (ИКИ)

В рамках исследований квазипериодических пульсаций рентгеновского излучения солнечных вспышек по данным наблюдений космического аппарата RHESSI в темпах счета его детекторов были обнаружены неизвестные ранее гармонические осцилляции с периодом около 75 с. Была изучена природа этих осцилляций. Посредством анализа данных телеметрии RHESSI совместно с исследованием характера прохождения рентгеновских фотонов солнечных источников через парные решетки вращающихся модулирующих коллиматоров телескопа показано, что осцилляции являются следствием нутации вращающегося космического аппарата. Предложена методика для выявления приборных осцилляций данного типа. Также показано, что осцилляции рентгеновского излучения вспышек с периодами от единиц до сотен секунд могут быть ложно интерпретированы в рамках модели вспышечной магнитной петли, подверженной моде перетяжек (сосисочной моде) быстрых магнитозвуковых волн. Этот факт необходимо принимать во внимание.

Зимовец И.В., Гармонические осцилляции рентгеновского излучения солнечной вспышки, Астрономический Журнал, т. 87, № 7, С. 717-736, 2010.

1.2.3. Исследование единого механизма развития самых крупных и самых малых по мощности солнечных вспышек (ИКИ).

По данным, полученным в проекте ИНТЕРБОЛ, были обнаружены слабые солнечные события с мощностью потока рентгеновского излучения не более 10⁻⁸ Вт/м². Изучены их характеристики. По данным проекта RHESSI изучались крупные вспышки класса X. Обнаружены дискретные минутные импульсы в жесткой компоненте рентгеновского излучения вспышек класса X. Проведен сравнительный анализ параметров солнечных событий разных классов. Показана возможность использования полученных данных для построения микро- и макромоделей солнечных вспышек. На основе обобщенных экспериментальных и теоретических результатов, полученных разными авторами в разные годы высказана и обоснована идея единого механизма самых крупных и самых малых по мощности солнечных вспышек. Изложен взгляд на солнечную вспышку, как суперпозицию отдельных актов элементарного энерговыделения.

Мирзоева И.К., Параметры и закономерности для построения микро- и макромоделей солнечных вспышек", Препринт ИКИ РАН, 2010г.

1.2.4. Диагностика положения области ускорения/инжекции и типа анизотропии энергичных электронов во вспышечных петлях. Закономерности пространственной динамики системы вспышечных петель (ГАО)

Для решения вопроса о связи положения в магнитной петле области ускорения/инжекции и питч-угловой анизотропии ускоренных электронов с пространственным распределением радиояркости, наклона частотного спектра и поляризации прежде всего необходимо рассчитать временную эволюцию пространственного распределения энергичных электронов вдоль магнитной петли. Наиболее адекватный путь для этого - решение кинетического уравнения Фоккера-Планка, учитывающего нестационарность инжекции, отражение от магнитных пробок и кулоновские столкновения. Ниже приводятся результаты расчетов для двух простых моделей. В первом случае (Модель 1) источник энергичных частиц расположен в вершине магнитной петли в точке s = 0, а во втором (Модель 2) - вблизи ее основания в точке $s = 2.4 \times 10^9$ см. Для расчета распределения яркости гиросинхротронного (ГС) излучения была рассмотрена магнитная петля в форме полукруга, расположенная на лимбе и повернутая по радиусу Солнца на 10° от плоскости солнечного диска. Расчет производился по точным формулам для коэффициентов ГС излучения и поглощения

Для Модели 1 расчеты дают распределение энергичных электронов с резким максимумом в центре петли. Степень концентрации ускоренных электронов в центре оказывается достаточной для того, чтобы получить здесь пик радиояркости. На Рис. 1а показана динамика распределения радиояркости ГС излучения вдоль петли в оптически тонком режиме. Видно, что пик яркости в вершине петли сохраняется на всем протяжении модельного всплеска (100 с).



Рис.1

Для Модели 2 распределение электронов по петле кардинально отличается от распределения в Модели 1 и сильно изменяется во времени – от двух максимумов на концах петли до максимума в ее центре, соответственно в начале и конце инжекции. Такое распределение создаёт два хорошо выраженных пика радиояркости вблизи оснований петли на фазе роста и максимума всплеска (Рис. 1b).

Как следует из нашего анализа, такими признаками могут быть распределения вдоль петли степени поляризации и локального спектрального индекса микроволнового излучения. Эти характеристики сильно зависят от степени анизотропии излучающих средне-релятивистских электронов.









Наши расчеты показывают, что распределения электронов по питч-углам, рассчитанные для Модели 1 и Модели 2 сильно отличаются в вершине: в Модели 1 на фазе роста инжекции наблюдается острый пик в области питч-угла 90°, который исчезает на фазе спада и распределение становится близким к изотропному; в Модели 2 на фазе роста вблизи питч-угла 90°, наоборот, наблюдается провал функции распределения, а пики имеют место в области питч-углов 50° и 130°, то есть, распределение по питч-углам вместо квазипоперечного становится квазипродольным.

На Рис.2 показаны распределения вдоль петли степени поляризации ГС излучения, полученные от соответствующих распределений энергичных электронов: левый график – для Модели 1, правый – для Модели 2. Видно, что распределения сильно отличаются друг от друга. Как показывает анализ, эти отличия обусловлены в первую очередь различиями в питч-угловом распределении излучающих электронов (см. Рис.2). Отличия заключаются не только в форме распределения, но и в знаке степени поляризации: для Модели 2 знак степени поляризации в центре петли соответствует обыкновенной моде. Это – характерный признак наличия продольной анизотропии в питч-угловом распределении нетепловых электронов.

На Рис.3 показаны соответствующие распределения локального спектрального индекса, рассчитанного вблизи частоты 17 ГГц. Как и на Рис.2, видны сильные отличия графиков для Модели 1 (левая панель) и для Модели 2 (правая панель). Резкое увеличение спектрального индекса в вершине петли для Модели 2 при квазипоперечном

распространении излучения – еще один характерный признак наличия продольной анизотропии в питч-угловом распределении нетепловых электронов

1.2.5. Закономерности пространственной динамики системы вспышечных петель (Природа энерговыделения, сопровождаемого ускорением частиц, выбросами плазмы и нагревом короны Солнца. (ГАО))

В данной работе мы использовали возможность для такого исследования, появившуюся в результате проведения одновременных наблюдений эруптивной двухленточной вспышки 22 августа 2005 ода на двух инструментах с высоким пространственным разрешением – микроволновых на Радиогелиографе Нобеяма и рентгеновских на RHESSI. Для анализа использовались также магнитограммы SOHO/MDI, наблюдения в линии H_alpha на телескопе SMART обсерватории Hida и в EUV-диапазоне на инструментах SOHO/EIT и TRACE. Исследовалась эволюция размеров, положения оснований и ориентации системы микроволновых петель, возникающих в ходе развития длительного (более часа) радиовсплеска, состоящего из шести 6 мощных пиков (см. Рис., верхняя панель).

В результате установлено, что:

1) длина и высота микроволновой петли сокращаются со скоростью ~16 км/с на фазе роста первого пика излучения, а затем увеличиваются в среднем со скоростью ~21 км/с (см. Рис., средняя и нижняя панели);

2) основания видимой яркой микроволновой вспышечной петли последовательно смещаются вдоль нейтральной линии (NL) фотосферного магнитного поля в течение всей вспышки, свидетельствуя о том, что энерговыделение и ускорение электронов происходит в разных петлях последовательно вдоль протяженной аркады;

3) шировый угол видимой петли и расстояние между основаниями, параллельное нейтральной линии, монотонно уменьшается в течение вспышки, свидетельствуя об уменьшении непотенциальности (релаксации шира) магнитного поля в области вспышки.

Обнаружено также, что а) первый мощный пик микроволнового излучения присутствует как в основаниях, так и в вершине петли, тогда как остальные пять пиков интенсивности видны лишь в области оснований (см. Рис., верхняя панель); б) после первого пика корональный источник жесткого рентгена находится выше апекса микроволновой петли и его высота увеличивается быстрее. Сделано заключение о двух качественно различающихся фазах развития наблюдаемой двухленточной вспышки.

На первой фазе (фазе уменьшения размеров вспышечных петель) питч-угловое распределение ускоренных электронов было более изотропно, чем на второй. На второй фазе (после первого пика) ускорение частиц шло в области над вспышечной аркадой преимущественно вдоль силовых линий магнитного поля. Показано, что такой тип ускорения может реализоваться в модели ускорения с коллапсирующей магнитной ловушкой.





Публикации по раздеам 1.2.4-1.2.5

1. Reznikova V.E., Melnikov V.F., Ji H., Shibasaki K. Dynamics of the flaring loop system of 2005 August 22 observed in microwaves and hard x-rays. – Astrophysical J. 2010, V.724, PP.171-181.

2. Melnikov V.F., Pyatakov N.P., Shibasaki K. Constraints for electron acceleration models in solar flares from microwave observations with high spatial resolution. – In: Astronomical Society of the Pacific. Conference Series, 2010 (accepted)

3. Reznikova V.E., Melnikov V.F., Shibasaki K. Microwave diagnostics of the position of an acceleration site and pitch-angle anisotropy of energetic electrons in the flare 24 Aug 2002. – In: Astronomical Society of the Pacific. Conference Series, 2010 (accepted)

4. Melnikov V.F. Constraints for electron acceleration models in solar flares from microwave observations with high spatial resolution (invited review). – In: Book of Abstracts. 38th COSPAR Scientific Assembly 2010 (18-25 July 2010, Bremen, Germany).

5. Reznikova V.E., Melnikov V.F., Ji H., Shibasaki K. Topology dynamics of the flaring loop 2005 august 22 observed in microwaves and hard x-rays. – In: Book of Abstracts. 38th COSPAR Scientific Assembly 2010 (18-25 July 2010, Bremen, Germany).

6. Мельников В.Ф., Пятаков Н.П. Ограничения на модели ускорения электронов в солнечных вспышках. -Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (8–12 февраля 2010 г., ИКИ РАН), Сборник тезисов, С.11

1.2.6. Особенности квазипериодических пульсаций (КПП) микроволнового излучения в пространственно разнесённых участках солнечной вспышки (ГАО)

При исследованиях солнечных вспышек особый интерес вызывают квазипериодические пульсации (КПП) их микроволнового излучения с периодами от нескольких до десятков секунд. В частности, радиогелиограф в Нобеяме (NoRH) имеет достаточно высокое угловое (5" и 10" на 34 и 17 ГГц, соответственно) и временное (100 мс) разрешения, чтобы определять пространственную структуру пульсирующих областей, фазовые соотношения в них и исследовать тонкую временную и и пространственную структуру КПП. Наблюдения с высоким пространственным и временным разрешением дают возможность отождествлять конкретные МГД моды колебательных процессов во вспышечных петлях и на этой основе проводить более глубокую диагностику вспышечного процесса.

Нами исследовалась временная эволюция микроволновых КПП на базе 12 вспышек, которые наблюдались одновременно Радиогелиографом и Поляриметрами в Нобеяме в период с 2002 по 2005 гг. Ниже приводятся некоторые резульаты.



Рис.1. Пульсации с постоянным периодом. Результаты вейвлет и автокорреляционного анализа вспышки 28 июля 2002, 23:00:20 – 23:02:32 UT, по данным NoRH на 17 ГГц. (а) Динамический вейвлет спектр модулированного сигнала $D_f(t)$, t = 10 с и наложенный на него нормированный временной профиль $F_f(t)$ радиоизлучения, полученные на NoRH на 17 ГГц.



Рис.2. Пульсации со спектральным дрейфом к более коротким периодам. Анализ вспышки 31 мая 2002, 00:06:40 – 00:08:20 UT наблюдаемой на 17 GHz. (а) Динамический вейвлет спектр модулированного сигнала $D_f(t)$, t = 10 с и наложенный на него нормированный временной профиль $F_f(t)$ радиоизлучения, полученные на NoRH на 17 ГГц. Тонкий сплошной контур показывает 95% уровень значимости. Правая панель представляет интегральный вейвлет спектр $D_f(t)$.



Рис.3. Пульсации со спектральным дрейфом к большим периодам. Анализ вспышки 03 июля 2002, 02:09:12 – 02:17:12 UT наблюдаемой на 17 ГГц. (а)



Рис.4. Пульсации с Х-образным дрейфом. Анализ вспышки 21 мая 2004, 23:47:10 – 23:50:30 UT. (а) Динамический вейвлет спектр модулированного сигнала $D_f(t)$, t = 30 с и наложенный на него нормированный временной профиль $F_f(t)$ радиоизлучения, полученные на NoRH на 17 ГГц. Правая панель представляет интегральный вейвлет спектр $\Delta_f(t)$

- 1. Kupriyanova et al. «Types of microwave quasi-periodic pulsations in single flaring loops» // 2010, Solar Physics, submitted. (DOI: 10.1007/s11207-010-9642-0)
- 2. Куприянова Е.Г., Мельников В.Ф., Шибасаки К «Особенности квазипериодических пульсаций (КПП) микроволнового излучения в пространственно разнесённых участках солнечной вспышки». Сборник трудов конференции «Солнечная и солнечно-земная физика 2010», стр.217-220..
- Куприянова Е.Г., Мельников В.Ф. «Особенности квазипериодических пульсаций (КПП) микроволнового излучения в пространственно разнесённых участках солнечной вспышки». Тезисы докладов конференции «Солнечная и солнечно-земная физика — 2010», с. 49.

1.2.7. Микроволновое излучение активных областей и колебательные процессы в радиоисточниках над пятнами (ГАО)

1. Для трех эруптивных событий, произошедших вблизи лимба Солнца, изучена динамика формирования постэруптивных аркад во время солнечных вспышек. Исследованы положение, морфология и спектральные характеристики рентгеновских источников (RHESSI), которые сопоставлялись с картиной, наблюдаемой в УФдиапазоне (195 A, EIT/SOHO) и данными микроволнового диапазона (РАТАН-600 и ССРТ). Характерными особенностями исследованных событий являются невысокая мощность (рентгеновский балл вспышек не превышал M3), большая продолжительность (несколько часов) и преобладание тепловых механизмов формирования излучения над нетепловыми. Особое внимание уделено изучению положения рентгеновских источников во время фазы подъема наблюдаемой в УФ системы послевспышечных петель. Проверялось, какая из моделей (тепловое излучение многотемпературной плазмы или одно-температурная модель с присутствием ускоренных частиц) может обеспечивать совпадение параметров плазмы по данным в разных диапазонах для одного и того же события. Показано, что в рассмотренных событиях для объяснения микроволновых и рентгеновских наблюдений достаточно учета только теплового излучения в рамках многотемпературной модели с определенным распределением температуры в источнике.

2. Исследована эволюция микроволнового излучения АО 10898 по спектральнополяризационным наблюдениям на РАТАН-600, в которой 6 июля 2006г произошло эруптивное событие (вспышка балла М2.4 и СМЕ). Выполнен анализ параметров плазмы в момент до вспышки и на стадии, предшествующей ускорению СМЕ по данным HXRдиапазона (RHESSI) и по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600. Сопоставление полученных результатов в рассматриваемом событии с результатами наблюдения эруптивного события 13 декабря 2006 года (связанная вспышка X3.4) и 25 ноября 2000 (связанная вспышка M3.5) показало, что характер развития эруптивного процесса и его геоэффективность определяются структурой и динамикой изменения магнитного поля в активной области в период, предшествующий вспышке.

3. Определено среднее значение минимального интегрального потока рентгеновского излучения Солнца за период 1995-1997гг, которое составило $5.1*10^{-9}$ Вт/м². Соответственно, температура спокойной короны в эпоху глубокого минимума в среднем не превышает T=1*10⁶ K, а количество вещества с более высокими температурами на 2-3 порядка ниже.

4. Исследована корреляция потоков Солнца в рентгеновском диапазоне (GOES 1-8Å) и интегральных потоков радиоизлучения Солнца на волнах 1.76, 3.2, 8, 15 и 30 см, измеренных на станции Нобеяма (NORP) в период минимума солнечной активности между 22 и 23 циклами в 1995-1997гг. Отмечена высокая корреляция на волнах 30,15, 8 и 3.2 см и низкая корреляция на волне 1.76 см. Показано, что флуктуации интегральных потоков микроволнового излучения Солнца в периоды самой минимальной активности, а также относительно низкие коэффициенты корреляции между микроволновым и рентгеновским излучением Солнца в эти периоды обусловлены, в основном, погрешностью измерений абсолютных значений интегральных потоков радиоизлучения Солнца.

5. Исследованы особенности короткопериодических колебаний (КПК) с периодами 1-10 мин в источниках радиоизлучения, связанных с пятнами, по наблюдениям на радиогелиографе Нобеяма на волне 1.76 см. Наиболее характерными периодами колебаний радиоизлучения источников, отождествленных с пятнами, являются периоды в 3 и 5 мин. Отмечены случаи эпизодического исчезновения колебаний с одним из указанных периодов (на примере анализа радиоизлучения АО 10661 за период 16-18 августа 2004г). Выявлено изменение спектра колебаний в связи со вспышками.

6. Исследованы долгопериодические колебания (40-170 минут) микроволнового излучения солнечных пятен по одновременным наблюдениям на двух частотах на радиогелиографе Нобеяма (NoRH) и Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ). Показано, что колебания различных периодов (40-60, 80-120, 160-170 минут) уверенно регистрируются на обоих инструментах. Выявленные колебания интерпретируются как собственные колебания пятен и свидетельствуют в пользу модели "мелкого" пятна.

Опубликованные тезисы докладов в 2010г:

1. И.Ю. Григорьева, Л.К. Кашапова, М.А. Лившиц, В.Н. Боровик «О возможной природе микроволнового и рентгеновского излучения постэруптивных аркад», сборник тезисов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 8-12 февраля 2010г, ИКИ РАН, с.20.

2) Л.К.Кашапова, И.Ю.Григорьева, В.Н. Боровик «Эволюция рентгеновских источников во время формирования постэруптивной аркады», сборник тезисов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 8-12 февраля 2010г, ИКИ РАН, с.11

3) Боровик В.Н., Григорьева И.Ю., Кашапова Л.К., Лившиц М.А. « Микроволновые наблюдения АО 10898 накануне эруптивного события 6 июля 2006г». Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конференции «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12-19 сентября, 2010, с.56.

4) I.Yu. Grigoryeva, L.K. Kashapova, M.A. Livshits and V.N. Borovik «Microwave radio observations of the AR 10898 before the CME/flare event on 6 July 2006», Scientific Program and Abstracts, CESRA2010, June 15-19, 2010, La Roche-en-Ardenne, Belgium, p.36.

5) L.K. Kashapova, I.Yu. Grigoryeva, V.N. Borovik «Characteristics of microwave and HXR emission during the post-eruptive arcade formation» Scientific Program and Abstracts , CESRA2010, June 15-19, 2010, La Roche-en-Ardenne, Belgium, p.53.

6) G.B.Gelfreikh, V.E.Abramov-Maximov, K.Shibasaki "Oscillations in sunspots with periods less than 1 minute observed in microwave range". Scientific Program and Abstracts, CESRA2010, June 15-19, 2010, La Roche-en-Ardenne, Belgium. p. 18.

7) V.E.Abramov-Maximov, G.B.Gelfreikh, K.Shibasaki "Pecularities of the short period oscillations of microwave emission of sunspot-associated sources as based on NoRH observations". Scientific Program and Abstracts, CESRA2010, June 15-19, 2010, La Roche-en-Ardenne, Belgium, p.33.

8) L.K. Kashapova, I.Yu. Grigoryeva, M.A. Livshits and V.N. Borovik "A study of plasma parameters before the CME/flare event on July 6, 2006: microwave vs HXR observations. Abstracts of the X-th Hvar

Astrophysical Colloquium "The Active Sun", 6-10 September, 2010, Hvar, Croatia, p.18.

9) Григорьева И.Ю., Боровик В.Н., Лившиц М.А., Кашапова Л.К. « Эволюция активной области АО 10898 перед вспышкой 6 июля 2006г по данным микроволновых и рентгеновских наблюдений». Сборник тезисов конференции "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", Санкт-Петербург, Пулково, 3-8 октября, 2010, с.104.

10) Абрамов-Максимов В.Е., Гельфрейх Г.Б., Шибасаки К. Короткопериодические колебания микроволнового излучения солнечных пятен и вспышечная активность. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", 3-9 октября 2010, Санкт-Петербург, ГАО РАН, Тезисы докладов, с.б.

11) Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю., Абрамов-Максимов В.Е. Долгопериодические колебания солнечных пятен в оптическом и радио диапазонах по данным SOHO и Nobeyama, Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", 3-9 октября 2010, Санкт-Петербург, ГАО РАН,

Опубликованные работы:

1. I. Yu.Grigoryeva, L.K. Kashapova, V.N. Borovik and M.A. Livshits. The post eruptive arcade formation in the limb event on July 31, 2004 from microwave solar observations with the RATAN-600 radio telescope. Sun and Geosphere, ISSN 1819-0839. The International Journal of Research and Applications, vol.5, No.2, 2010, pp.

2. Абрамов-Максимов В.Е., Гельфрейх Г.Б., Сыч Р.А, Шибасаки К. Короткопериодические колебания микроволнового излучения солнечных пятен и вспышечная активность. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", 3-9 октября 2010, Санкт-Петербург, ГАО РАН, стр 15-18..

3. Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю., Абрамов-Максимов В.Е. Долгопериодические колебания солнечных пятен в оптическом и радио диапазонах по данным SOHO и Nobeyama, Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", 3-9 октября 2010, Санкт-Петербург, ГАО РАН. Стр 277-282

4. Григорьева И.Ю., Боровик В.Н., Лившиц М.А., Кашапова Л.К. « Эволюция активной области АО 10898 перед вспышкой 6 июля 2006г по данным микроволновых и рентгеновских наблюдений». Труды Всероссийской ежегодной конференции "Солнечная и солнечно-земная физика - 2010", Пулково, 3-8 октября, 2010, Санкт-Петербург, 2010. стр.119-122.

5. Медарь В.Г., Боровик В.Н. « Микроволновое и рентгеновское излучение Солнца в эпоху минимума солнечной активности». Труды Всероссийской ежегодной конференции "Солнечная и солнечноземная физика - 2010", Пулково, 3-8 октября, 2010, Санкт-Петербург, 2010. стр.253-256

Сданные в печать работы:

1. I.A. Bakunina, V.E. Abramov-Maximov, S.V. Lesovoy, A.A. Solov'ev, Yu.V. Tikhomirov, V.F. Melnikov, K. Shibasaki, Yu.A. Nagovitsyn, V.M. Nakariakov, Long Period Oscillations in the Microwave Emission from Sunspots, сдано в Solar Physics.

1.2.8. Исследование проблемы нагрева корональной плазмы (ИПФ)

Проведено исследование проблемы нагрева корональной плазмы. Поскольку радиационные потери в корональной плазме весьма велики, необходимо, чтобы в ней существовали достаточно мощные источники нагрева, чтобы поддерживать корону в квазистационарном состоянии. Проведен анализ существующих механизмов нагрева (диссипация токов, магнитное пересоединение, микровспышки, волновой нагрев) с точки эффективности и проработанности. зрения ИХ Сделан вывод. что наиболее перспективными механизмами с энергетической точки зрения могут быть нагрев микровспышками и волновой нагрев. Что касается нагрева магнитным пересоединением, то этот механизм подробно не исследован с точки зрения его эффективности и условий реализации. Нагрев в результате джоулевой диссипации электрических токов возможен лишь в случае сильной филаментации токов, наличие которой пока невозможно проверить вследствие недостаточной разрешающей способности наблюдений. Показано, что одним из самых важных источников энергии для нагрева корональной плазмы является

фотосферная конвекция, которая может возбуждать в корональных магнитных петлях звуковые волны, диссипация которых приводит к нагреву. Показано, что в солнечной короне существует особый класс магнитных петель, собственная звуковая частота которых находится в резонансе с частотой 5-минутных фотосферных осцилляций скорости. Это приводит к параметрическому возбуждению интенсивных звуковых колебаний в таких петлях. Оценена энергия звуковых колебаний, возбуждаемых в корональных магнитных петлях при параметрическом резонансе, рассмотрена диссипация звуковых колебаний и показано, что скорость диссипации достаточна для нагрева плазмы до корональных температур. Показано, что условиям резонанса удовлетворяют так называемые квазистационарные рентгеновстие петли с температурамт 3-6 МК, наблюдавшиеся в мягком рентгеновском излучении спутником Yohkoh, а также магнитные петли на звездах поздних спектральных классов.

- Зайцев В.В., Кислякова К.Г., Нагрев плазмы при параметрическом возбуждении звуковых колебаний в корональных магнитных петлях // Астрономический журнал, 2010, том 87, №4, с. 410–416.
- Зайцев В.В. Проблема нагрева корональной плазмы // Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 28-30 июня 2010 г., Программа и тезисы докладов, 2010, стр.10.
- Зайцев В.В. Источники нагрева магнитных петель в солнечной короне // Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12-19 сентября 2010 г., Тезисы докладов, 2010, стр.57.
- Zaitsev V.V., Kislyakova K.G. Coronal loop plasma heating driven by parametric resonance with p-modes // The XI Russian-Finnish Radio Astronomy Symposium, 18-22 October, 2010, Puschino, Moscow Region. Abstracts, 2010, p. 24.

1.2.9. Диагностика колебаний магнитных силовых трубок на Солнце по характеристикам зебра-структуры (ИПФ)

Доказана возможность получения информации о колебательных процессах в магнитных силовых трубках на Солнце на основании анализа волнообразного частотного дрейфа зебра-структуры на динамическом спектре солнечного радиоизлучения (см. Рис. 1). Колебательное изменение частоты полос неоднократно регистрировалось на динамических спектрах солнечного радиоизлучения, содержащих зебра-структуру. На 25.10.1994, примере события зарегистрированного радиоспектрографом Астрономического института Потсдама, 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. Данная концепция подтверждается совпадением величины наблюдаемого периода осцилляций с периодом БМЗ волн, а также увеличением периода колебаний с номером гармоники, что предсказывается теорией. Продемонстрирована возможность восстановления параметров источника зебра-структуры по наблюдаемым параметрам осцилляторной структуры спектра. Например, зная период колебаний и величину альфвеновской скорости, которая в двойного резонанса определяется только номером **VCЛОВИЯХ** соответствующей гирорезонансной гармоники, мы можем найти диаметр осциллирующей трубки. Для источника события 25.10.1994 этот размер оказался существенно меньше, чем найденный из оптических и радиоизмерений размер силовой трубки. Это означает, что внутри довольно толстой корональной петли существовала значительно более узкая трубка, заполненная горячими неравновесными электронами, которые являлись источником излучения зебра-структуры с осциллирующими частотами полос повышенного излучения. Предложенная интерпретация о колебаниях магнитной трубки как целого подтверждается квази-синхронным изменением частоты излучения различных гармоник, источники которых разнесены в пространстве.



Рис. 2 Динамический спектр события 25.10.1994 с осциллирующей зебра-структурой

- Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H. Radio diagnostic of 1 oop oscillations with wavy zebra patterns // Central Europ. Astrophys. Bull. 2010 (in press).
- Злотник Е.Я., Зайцев В.В., Аурасс Г. Диагностика колебаний магнитных силовых трубок на Солнце по характеристикам тонкой структуры спектра радиоизлучения // Письма в АЖ, 2010 (направлено в печать).
- Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H. Radio signature of coronal magnetic loop oscillations (zebra pattern wavelike frequency drift) // Abstracts of the X-th Hvar Astrophysical Colloquium "The Active Sun," Sept. 2010, Hvar, Croatia, p. 25.

1.2.10. Основы ультрафиолетовой диагностики крупномасштабных солнечных эрупций (ИЗМИРАН)

Разработаны основы ультрафиолетовой диагностики крупномасштабных солнечных эрупций (Coronal Mass Ejections, CMEs) – источников интенсивных нерекуррентных возмущений космической погоды. Рассмотрены события 23-его цикла, в которых геомагнитные бури с амплитудой |Dst| > 100 нТл надежно отождествлены с их источниками в центральной зоне солнечного диска. Установлено, что для таких событий имеет место тесная статистическая связь между количественными параметрами временных депрессий излучения (диммингов) и постэруптивных аркад, вызываемых CMEs, с одной стороны, и величиной нерекуррентных Форбуш-понижений потока фоновых космических лучей, амплитудой сильных геомагнитных бурь, а также временем распространения межпланетных возмущений от Солнца до Земли – с другой. Количественные параметры диммингов и аркад, в частности, их суммарный магнитный поток продольного поля на уровне фотосферы, определялись по данным телескопа крайнего ультрафиолетового диапазона SOHO/EIT в канале 195 Å и магнитограммам SOHO/MDI. Полученные результаты означают, что характеристики сильных нерекуррентных возмущений космической погоды время распространения И межпланетных облаков до Земли в значительной мере определяются измеряемыми параметрами солнечных эрупций и могут оцениваться заблаговременно по наблюдениям диммингов и аркад в крайнем УФ диапазоне.



Рис. 1. Эрупция 3 апреля 2010 г. (а) Разностное изображение солнечного диска в канале 195 Å с диммингами (темные области) и ПЭ аркадой (яркая структура). (б) Контуры диммингов и аркады на фоне магнитограммы MDI.



Рис. 2. Зависимость величины Форбуш-понижения (A_F) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы (Φ). (а) Одиночные события, уверенно отождествленные с одной конкретной солнечной эрупцией (зачернённые символы \blacksquare , \blacktriangle). Пунктир – линия регрессии. (б) Все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или с вероятным отождествлением с солнечным источником (незачернённые символы \Box , \triangle). Квадраты относятся к эрупциям в активных областях, треугольники – к эрупциям вне активных областей.



Рис. 3. Зависимость транзитного времени (T_t) от суммарного магнитного потока диммингов и аркад на уровне фотосферы (Φ). (а) Одиночные события, уверенно отождествленные с одной конкретной солнечной эрупцией. (б) Все события, включая сложные, связанные с несколькими CMEs/ICMEs, и/или с вероятным отождествлением с солнечным источником. Обозначения такие же, как на Рис. 2.

1.2.11. Анализ воздействия корональных выбросов на удаленные корональные лучи (ИЗМИРАН)

Анализировалось воздействие корональных выбросов на удаленные корональные лучи по данным наблюдений коронографов SOHO/LASCO. Прохождение выброса в короне вызывает искривление удаленного луча, которое перемещается вдоль него наподобие изгибной (кинк) волны. В ряде работ такое возмущение удаленных от траектории выбросов лучей трактуется как свидетельство распространяющихся в короне ударных волн, инициируемых быстрыми выбросами. Однако такое же возмущение производит магнитное поле электрического тока, ассоциированного с выбросом. Нами рассчитано искривление прежде радиальных силовых линий при движении в короне магнитного жгута, которое хорошо соответствует наблюдаемым изменениям формы корональных лучей. Если для быстрых, движущихся со сверхальвеновской скоростью, выбросов нельзя генерации ударных волн. искривление лучей медленными, исключить то распространяющимися с доальвеновской скоростью, выбросами может быть вызвано только магнитным давлением, создаваемым электрическими токами внутри выбросов.

1.2.12. Вопрос о местонахождении источников первичного энерговыделения солнечных вспышек (ИЗМИРАН)

Исследовался вопрос о местонахождении источников первичного энерговыделения солнечных вспышек применительно к двухленточным вспышкам с наблюдающимся движением источников жесткого рентгеновского излучения преимущественно вдоль вспышечных лент. Предполагается, что местом первичного энерговыделения являются самопересечения поверхностей = 0. *F*-дифференциальный точки Fфактор, характеризующий структурные особенности потенциального магнитного поля. Исследовались несколько вспышечных событий, но наиболее полно рассмотрены 2 вспышки: 9 ноября 2002 г. в 13:12 UT и 17 января 2005 г. в 09:43 UT, уже изучавшиеся ранее другими авторами. Оказалось, что источники нетеплового жесткого рентгеновского излучения связаны силовыми линиями с совокупным набором рассчитанных магнитных особенностей. Таким образом, можно полагать, что в сложных вспышечных событиях источники первичного энерговыделения располагаются в таких же магнитных особенностях, что и во вспышках с более простой морфологией.

1.2.13. Многоволновое исследование длительной белой вспышки 4 июня 2007 г. (ИЗМИРАН)

Проведено многоволновое исследование длительной белой вспышки 4 июня 2007 г. в активной области AR NOAA 10960. Использовались наблюдения космических аппаратов SOHO, Hinode, TRACE, STEREO. Примечательной особенностью вспышки была активизация скрученного магнитного жгута за двадцать минут до максимальной фазы вспышки, и затем его частичная ограниченная эрупция. Значительные изменения произошли в полутени солнечного пятна, с которым связан корональный магнитный жгут. Спиральная полутень сильно сократилась за пару часов после начала вспышки и волокна полутени стали менее искривленными. Предложен сценарий развития вспышки в результате частичного пересоединения силовых линий жгута с окружающими полями. Ограниченность эрупции связана с наличием сильного дипольного поля активной области, медленно убывающего с высотой. Вышедший из равновесия жгут находит новое положение устойчивого равновесия на большей высоте.

1.2.14. Анализ динамических спектров 37 солнечных радиовсплесков III типа в диапазоне частот 40 - 400 Мгц (ИЗМИРАН)

Выполнен анализ динамических спектров 37 солнечных радиовсплесков III типа в диапазоне частот 40 - 400 Мгц. Установлено, что центральная частота излучения меняется со временем по закону f ∞ (t-t₀)^{- α} со средним и медианным значениями α 1,2 и 0,5 соответственно. Для 84% событий значение α меньше 1,2. При постоянной скорости электронов это означает, что плотность в короне до высот ~ 1 R₀ фотосферой меняется как (r-r₀)^{- β} со средним и медианным значениями β 2,4 и 1 соответственно, т.е. типичный профиль плотности в короне является более плавным по сравнению с существующими эмпирическими моделями. В событиях с β ~ 2 изменение плотности с высотой подобно солнечному ветру, т.е. в соответствие с законом сохранения потока массы в случае малого ускорения плазмы и конической формы потока. Меньшие значения β могут быть связаны с эффектами неконической формы потока, замедления корональной плазмы или кривизны силовых линий магнитного поля. Показано, что эффекты кривизны силовых линий магнитного поля недостаточны для объяснения малых значений β . Установлено также, что для радио всплесков из одной группы характерны близкие значения β , что подтверждает их связь с одной активной областью на Солнце.

1.2.15. Анализ нелинейного характера вспышечного энерговыделения (ИЗМИРАН)

С пелью выяснения нелинейного характера вспышечного энерговыделения использованы усредненные данные КОРОНАС-ФОТОН скорости счета 9 каналов мягкого (SXR) (1.7–16.9) КэВ и одного жесткого (HXR) канала (> 20 КэВ) рентгеновского излучения вспышки 5 июля 2009 г. Рентгеновский класс вспышки С2.7. Излучение выше 25 кэВ не регистрировалось. Дифференциальный метод анализа позволил обнаружить во временных профилях потоков SXR, HXR, температуры, меры эмиссии и давления ускоренные и замедленные по сравнению с экспоненциальным законом режимы на фазах роста и спада. Обнаружен новый эффект («модифицированный эффект Нойперта»): с максимумом производной меры эмиссии. максимум потока HXR совпадает Возрастание меры эмиссии определяется, главным образом, потоками ускоренных частиц, генерирующих потоки HXR. На основе энергетического баланса наблюдаемые эффекты связываются с нелинейным характером источников нагрева и охлаждения.

1.2.16. Изучение релятивистских протонных событий (ИЗМИРАН)

Техника вэйвлет-анализа, впервые использованная нами в 2009 г. для изучения релятивистских протонных событий (Ground Level Enhancements – GLEs), получила в 2010 г. дальнейшее развитие. В интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) перед GLEs обнаружен ряд пульсаций, которые можно считать предвестниками генерации будущих протонных событий (прихода энергичных солнечных протонов к Земле). Кроме того, в диапазоне периодов ~ 1 суток выявлены аналогичные пульсации в поведении числа солнечных пятен (SS) и коронального индекса (CI). Это совпадение явно указывает на синхронизацию подфотосферных и корональных процессов, ответственных за генерацию СКЛ. Иными словами, ускорение СКЛ может быть не локальным явлением, но способно вовлекать общирные области в атмосфере Солнца (протяженные корональные структуры).

1.2.17. Новая топологическая модель и временной сценарий для гамма-вспышки 23 июля 2002 г. (ИЗМИРАН)

На основе анализа комплекса данных предложена новая топологическая модель и временной сценарий для гамма-вспышки 23 июля 2002 г. Предварительные оценки показывают, что ускорение ионов до энергий ~10-100 МэВ в этой вспышке могло

произойти за счёт вихревого электрического поля, генерируемого в корональных арках быстрого СМЕ. Результирующий спектр ионов при этом должен быть довольно мягким (показатель ≥ 4-5), что очень важно для понимания некоторых особенностей наблюдавшегося гамма-излучения в линиях.

1.2.18. Анализ экстремального солнечного события (GLE) 20 января 2005 г. (ИЗМИРАН)

Проведены модельные расчеты скорости счёта гамма-квантов в линии 2.223 МэВ для экстремального солнечного события (GLE) 20 января 2005 г. Для сравнения с наблюдениями использовались временных профили скорости счета гамма-квантов с энергией 2.223 МэВ и в диапазоне энергий 4-7 МэВ (аппаратура АВС-Ф/детектор СОНГ-Д на борту КА КОРОНАС-Ф). Получены новые подтверждения того, что для построения адекватной картины гамма-вспышки 20 января 2005 г. необходимо допустить повышенное содержание изотопа ³He относительно водорода ¹H, а именно: ³He/¹H \geq 1.1×10⁻⁴, тогда как обычно для области генерации линии 2.223 МэВ его принимают равным (2÷3)×10⁻⁵. Этот результат согласуется с оценками отношения ³He/¹H, полученными для этой же вспышки ранее из анализа данных о других излучениях (например, по измерениям состава энергичных солнечных частиц на орбите Земли).

Список работ для проектов 1.2.10.-1.2.18

И.М. Черток, А.В. Белов, В.В. Гречнев. Зависимость величины Форбуш-понижений от параметров солнечных эрупций. Материалы 31-ой Всероссийской конференции по космическим лучам, МГУ, Москва, 5-9 июля 2010 г., MOD_07.pdf (электронная публикация). Ее можно найти на сайте <u>http://cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/mod/mod_07.pdf</u>.

И.М. Черток, А.В. Белов, В.В. Гречнев. Зависимость величины Форбуш-понижений от параметров солнечных эрупций. Известия РАН. Серия физическая, август 2010 г.

Filippov B., Srivastava A.K., Deflection of coronal rays by remote CMEs: shock wave or magnetic pressure?, Solar Physics, **266**, 123-134, 2010.

Ден О.Г., Зимовец И.В., Области первичного энерговыделения солнечных вспышек и их связь с особенностями магнитного поля, Астрон. журн., **87**, №5, 503-512, 2010.

V. V. Lobzin, I. H. Cairns, P. A. Robinson, A. Warmuth, G. Mann, R. V. Gorgutsa, and V. V. Fomichev, EVIDENCE FOR GENTLY SLOPING PLASMA DENSITY PROFILES IN THE DEEP CORONA: TYPE III OBSERVATIONS, Astrophysical Journal, 724:1099–1107, 2010 December 1

Е.В. Троицкая, И.В. Архангельская, Л.И. Мирошниченко, А.И. Архангельский. Диагностика области солнечной вспышки 20 января 2005 г. методом моделирования гамма-излучения в линии 2.223 МэВ. – Космические Исследования, 2010 (в печати).

1.2.19. Исследования энергетических спектров рентгеновского и гамма-излучения Солнца (ФТИ)

Прибор «ПИНГВИН-М», запущенный в январе 2009 г. на околоземную орбиту на космическом аппарате «КОРОНАС-ФОТОН», является рентгеновским поляриметромспектрометром, предназначенным для исследования энергетических спектров рентгеновского и гамма-излучения Солнца в диапазонах энергий 18 – 450 кэВ и 2–20 кэВ, их эволюции в процессе солнечных вспышек, а также для измерения степени линейной поляризации жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 20 –150 кэВ.

В период с февраля по декабрь 2009 г. активность Солнца находилась на крайне низком уровне, возможно, самом низком и глубоком за время наблюдения за активностью Солнца из космоса. За время полета прибором было зарегистрировано 172 солнечные вспышки, в том числе: 58 вспышек класса А; 101 вспышка класса В; 13 вспышек класса С.. Поскольку регистрация интенсивности велась одновременно в нескольких энергетических каналах, это позволило исследовать временную эволюцию температуры плазмы и меры эмиссии для этих событий. Рассмотрены различные статистические

характеристики зарегистрированных солнечных вспышек классов В и С по классификации GOES.

Для верификации данных, полученных в ходе эксперимента важно сравнить данные с результатами, полученными в других экспериментах. На Рисунке приведены данные по мощности потоков мягкого рентгеновского излучения для солнечной вспышки 26.10.2009 г. с данными аппаратуры, работающей на спутнике GOES (который является своеобразным эталоном по измерению мощностных характеристик вспышек) в близких энергетических диапазонах. С учетом небольшого различия в энергетических диапазонах видно хорошее согласие в результатах, что подтверждает ожидаемые для прибора характеристики в мягком рентгеновском диапазоне 2–20 кэВ.



Рисунок. Поведение потоков мягкого рентгеновского излучения в эксперименте а) GOES и б) ПИНГВИН-М.

В процессе наблюдений было зарегистрировано всего несколько вспышек с появлением значимых потоков жесткого рентгеновского излучения с энергиями более 15 кэВ. Этот факт хорошо подтверждается распределением числа вспышек по температуре изучающей плазмы.

А.С.Гляненко и др. Изучение характеристик рентгеновских вспышек от спокойного Солнца прибором ПИНГВИН-М на борту спутника «КОРОНАС-ФОТОН». Известия РАН, серия физ. Т. 75, № 5, 2011, в печати.

2. Физические процессы в гелиосфере

2.1. Связь явлений в межпланетной плазме со структурой и динамикой солнечной короны

2.1.1. Солнечные источники бури ноября 2004г. (ИЗМИРАН)

Существенно уточнены и детализированы современные представления о солнечных источниках и МГД-структуре околоземных возмущений в ходе гелиосферной бури ноября 2004 г. В частности, показано, что при теоретическом моделировании этих возмущений необходимо учитывать сильную деформацию магнитных облаков из-за их взаимодействия с секторными границами и ударными волнами.

2.1.2. Возникновение, динамика, геоэффективность и диссипация 4-х секторной структуры на фазе спада 23-го цикла (апрель 2004 – декабрь 2005 г.) (ИЗМИРАН)

Продолжено более подробное исследование обнаруженного ранее квазидвухлетнего МГДпроцесса "Возникновение, динамика, геоэффективность и диссипация 4-х секторной структуры на фазе спада 23-го цикла (апрель 2004 – декабрь 2005 г.)". В частности, подтверждено, что на втором этапе этого процесса имел место "взрыв" "сингулярности" крупномасштабного открытого магнитного поля Солнца (КОМПС), ассоциированный с мощной группой пятен АО 10656. Установлено: что "взрыв" сопровождался колоссальным внешним (в корону) и внутренним (в конвективную зону) выделением энергии. В короне это были два симметричных корональных выброса 18.08.04, с общей энергией ~10³¹ эрг., распространявшихся вдоль нулевой изолинии КОМПС; в конвективной зоне – гидродинамический импульс с "анемонной" АО 10667 на месте "сингулярности", продуцировавший сателлитное пятнообразование, распространявшееся к западу, в сторону вращения Солнца ("западный фронт" – АО 10687) и к востоку, в направлении зоны активных долгот – АО 10693, с внешними энерговыделениями соответственно 3·10³¹ и 2.8·10³¹ эрг. Взаимодействие восточного фронта с зоной активных долгот породило и дестабилизировало активный комплекс с АО 10696, ответственный за гелиосферную бурю начала ноября 2004 г.

2.1.3. Результаты радиопросвечивания на радиотелескопах РАО РАН, г.Пущино (ИЗМИРАН)

Эксперименты по просвечиванию внешней солнечной короны (R<70 Rs) за период 1987-2009 гг. с использованием двух модификаций метода просвечивания на радиотелескопах РАО РАН, г.Пущино (ДКР-1000 и РТ-22) позволили осуществить визуализацию гелиоширотной струйной структуры солнечного ветра на основе построении гелиоширотной зависимости звуковой точки солнечного ветра Rin и внешней границы короны звуковой области Rout, а также изучить корреляционную диаграмму зависимости Rin=F(IBrI) – звуковой точки солнечного ветра Rin от напряженности магнитного поля в IBrI. В результате установлено, что: 1) В радиокартах гелиоширотной источнике структуры потоков солнечного ветра, данные 1987-2009гг., в 23-ем солнечном цикле, в 2008г. возникла аномалия, которая связана с развитием необычной, вытянутой в радиальном направлении формы внутренней гелиосферы в приэкваториальной зоне. В 2009 г. эта аномалия сохранилась в значительно ослабленном виде. 2) Возникшая в 2008 г. на фазе ожидаемого завершения 23-го цикла необычная форма внутренней гелиосферы связана с развитием неизвестного ранее типа потоков солнечного ветра в структуре корреляционной диаграммы: Rin=F(IBrI) Это - компонента потоков солнечного ветра с очень низкими скоростями от источников в солнечной короне в виде крупномасштабных экваториальных корональных дыр. На корреляционной диаграмме Rin=F(IBrI) 2009г. статистическая представляемость данной компоненты значительно сократилась, но полностью не исчезла. Таким образом, в результате непредсказуемого хода эволюции источников солнечного ветра и возникновения компоненты очень медленного солнечного ветра 23-ий цикл солнечной активности по спектру потоков и продолжительности цикла можно рассматривать как аномальный.

2.1.4. Связь галактических космических лучей с магнитным полем Солнца (ИЗМИРАН)

На основе модели, связывающей долговременные вариации галактических КЛ с характеристиками солнечного магнитного поля, определена модуляция КЛ для периода 1953-2008 гг. и вклады в модуляцию от воздействия каждого из модулирующих солнечных индексов. В качестве параметров модуляции КЛ рассмотрены и

проанализированы особенности долговременных изменений характеристик магнитного поля Солнца (интегральный индекс Bss и парциальные - ZO-зонально-нечетный и секториально-нечетный SO) совместно с углом наклона токового слоя η и специально введенным индексом Fx, учитывающим рентгеновские вспышки. Данных прямых наблюдений характеристик солнечных магнитных полей за столь длительный период нет, они имеются только начиная с 1976 г., поэтому в работу были включены и косвенные (оптические) данные для 1953-1976 гг. Получено: 1. Подтверждена адекватность предложенной модели на основе сравнения наблюдаемых вариаций КЛ в 2003-2008 гг. с прогнозом вариаций, выполненным panee [Belov A.V. et al., 2006]. 2. Наклон гелиосферного токового слоя п, полученный на расстоянии R=3.25R₀ позволяет в минимуме 23 цикла наилучшим образом представить картину модуляции КЛ. 3. Вклад в модуляцию КЛ от изменений Bss, ZO и Hpol на спаде 23-его цикла ниже, чем в соответствующих периодах предыдущих циклов. Использованная модель успешно справляется с необычной ситуацией. Небольшой вклад от изменений Bss, ZO и Hpol в этот период компенсируется увеличенным (по сравнению с вкладом в минимумы других циклов) вкладом от изменений наклона η.



Рис.1 - Наклон токового слоя наблюдаемый и прогнозируемый на расстояниях 3.25 R_o и 2.5 R_o.



Рис.2 - Вклад в модуляцию КЛ (в % к 1976) от циклических изменений средней напряженности поля на поверхности источника солнечного ветра B_{SS} (интегрального индекса) и наклона токового слоя η.

2.1.5. Связи характеристик Форбуш-эффектов с характеристиками сопутствующих межпланетных и геомагнитных возмущений (ИЗМИРАН)

По данным за 1957-2007 гг. исследованы связи характеристик Форбуш-эффектов(ФЭ) с характеристиками сопутствующих межпланетных и геомагнитных возмущений. Это сделано для двух типов событий: а) начинающихся вместе с внезапным началом (SSC)

геомагнитной бури и б) начинающихся без SSC. Показано, что 1) собранные в базе данных события позволяют выявлять и изучать как связи между внутренними параметрами Форбуш-эффектов, так и связи между характеристиками ФЭ и параметрами межпланетной среды и индексами геомагнитной активности. 2) Существует явная корреляция между величиной ФЭ и параметрами межпланетного возмущения, а также между величиной ФЭ и индексами геомагнитной активности. 3)Для событий, начинающихся с прихода ударной волны (SSC), и без прихода ударной волны – выявленные связи существенно различаются. 4) Различия в выделенных группах событий, скорее всего, связано с тем, что в этих группах преобладают различные источники возмущений солнечного ветра (выбросы солнечного вещества или корональные дыры).



Рис. 2b. Зависимость величины Форбуш-эффекта от произведения максимальных для данного возмущения напряженности В_{max} ММП и скорости V_{max} солнечного ветра.



Рис. 3. Взаимосвязь величины Форбуш-эффекта и Ар-индекса геомагнитной активности..
2.1.6. Галактические космические лучи в январе 2005 (ИЗМИРАН)

Январь 2005 год был отмечен одним из самых значительных всплесков солнечной активности в 23-м цикле, приведшем, в частности, к существенным вариациями как солнечных, так и галактических космических лучей. На основе данных мировой сети нейтронных мониторов, обработанных методом глобальной съёмки, исследовано поведение плотности, анизотропии и градиента галактических космических лучей в январе 2005 г. Особое внимание уделено Форбуш-понижению, начавшемуся 21 января и обусловленному теми же событиями на Солнце, которые стали причиной гигантского возрастания солнечных космических лучей 20 января.



Рис.1. Вариации напряжённости ММП В и скорости солнечного ветра V (верхняя панель); плотности A10 и экваториальной составляющей анизотропии Axy космических лучей с жесткостью 10 ГВ (средняя панель), Кр и Dst-индексов геомагнитной активности (нижняя панель).

Показано, что это Форбуш-понижение является аномальным и полностью выпадает из ряда других событий, связанных с далёкими западными солнечными источниками. Это хорошо демонстрирует нижеприведенный рис.2.



Рис.2. Связь величины A_F всех 162 Форбуш эффектов, связанных с западными солнечными источниками (>W35) с максимальной скоростью спада Dmin плотности КЛ в этом событии. В правом нижнем углу выделяется одна точка – это событие 21 января 2005 года. Прямая соответствует линейной регрессии между A_F и Dmin.

Иванов К. Г. Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3-10 ноября 2004 г.: 1. Динамика поля и солнечная активность // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 50. №3. С. 298-310. 2010.

Иванов К. Г. Вытеснение крупномасштабных открытых магнитных полей Солнца из зоны активных долгот и гелиосферная буря 3-10 ноября 2004 г.:2. "Взрыв" "сингулярности", динамика пятнообразования и энерговыделения. // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 50. №6. С. 1-16. 2010.

A. V. Belov, E. A. Eroshenko, O. N. Kryakunova, V. G. Kurt, and V. G. Yanke "Ground Level Enhancements of Solar Cosmic Rays during the Last Three Solar Cycles", Geomagnetizm i Aeronomiya, Vol. 50, No. 1, p.21, 2010 R. T. Gushchina, A. V. Belov, V. N. Obridko, and B. D. Shelting, "Long-Term Modulation of Galactic Cosmic

Rays at Solar Activity Minimums", Geomagnetizm i Aeronomiya, V. 50, No. 4, P.446-443. 2010.

A.Abunin, "Forbush-effects with sudden and gradual onset", 22nd European Cosmic Ray Symposium in Turku, Finland, 3-6 August 2010.

Н.А.Лотова, К.В.Владимирский, В.Н.Обридко. Диагностика потоков солнечного ветра и их источников в солнечной короне// Геомагнетизм и Аэрономия. 2010. Т.50. № 6. С.739-748.

2.1.7. Обнаружение квазипериодических флуктуаций плотности плазмы 5-минутного диапазона во внешней короне Солнца (ИРЭ и ПРАО ФИАН)

А) В результате анализа данных, полученных в эксперментах радиозондирования солнечного ветра сигналами космических аппаратов MARS-EXPRESS (2004, 2006, 2008/09), VENUS-EXPRESS (2006) и **ROSETTA** (2006)временных спектрах BO флуктуаций частоты впервые обнаружены квазипериодические компоненты. Выделенная квазипериодическая модуляция присутствует в 20% времени наблюдения и носит спорадический Характерное характер. время жизни квазипериодических возмущений ~30 мин. Средняя максимума спектральной плотности частота составляет П_{тах}=5.5 мГц (период флуктуаций ~3 мин.) в области гелиоцентрических расстояний Солнца. менее 8 радиусов Ha дистанциях, 10R_s, превышающих средняя частота квазипериодических флуктуаций $\square_{\text{max}}=4.3$ мΓц Относительная (период ~4 мин.). ширина спектральной линии $\Delta \Box / \Box_{\max}$ И превышение спектральной плотности над фоновым значением остаются неизменными на расстояниях от 4 до 40 солнечных радиусов и составляют в среднем 1.0 и 2.9 соответственно.



Ответственные за флуктуации частоты квазипериодические флуктуации плотности плазмы во внутреннем солнечном ветре могут быть объяснены распространяющимися от Солнца магнитогидродинамическими волнами, которые, как следует из наших данных, играют важную роль в энергетическом балансе солнечной короны и солнечного ветра.

Б) Систематизированы и проанализированы данные о флуктуациях интенсивности и частоты монохроматических радиоволн, полученные в крупномасштабных циклах радиозондирования околосолнечной плазмы, проведенных в период с 1975 по 2002 год. Получены радиально-широтные распределения для формы энергетического спектра турбулентности, внутреннего и внешнего масштабов, подтвержден вывод об изменении режима турбулентности при переходе из области ускорения солнечного ветра в область установившегося течения (совместно с ПРАО, Боннским и Кельнским университетами).

- Efimov A.I., Armand N.A., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Chashey I.V., Bird M.K. Investigation of Coronal Mass Ejections by the Two-Position Radio Sounding Method // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. № 8. P. 1165-1169.
- A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold, S. Tellmann. Quasi-periodic fluctuations detected in MARS-EXPRESS coronal radio sounding observations // in: Solar-Wind-12. International Conference. AIP Conf. Proc. ed. by M. Maksimovic et al. 2010. V.1216. P. 90-93.
- Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Rudash V.K., Chashey I.V., Bird M.K., Pätzold M., Tellmann S. Coronal radio sounding experiments with MARS-EXPRESS: Scintillation spectra during low solar activity // in: Solar-Wind-12. International Conference. AIP Conf. Proc. ed. by M. Maksimovic et al. 2010. V.1216. P. 94-97.
- 4. А.И. Ефимов, Т. Имамура, К.И. Ояма, К. Ногучи, Л.Н.Самознаев, А.С. Набатов, М.К.Бёрд, И.В. Чашей. Свойства турбулентности солнечного ветра по данным радиозатменных экспериментов с космическим аппаратом NOZOMI // Астрон. Журн. 2010. Т. 87. № 11. С. 1120-1129. (Astron. Rep. 2010. V. 87. № 11. Р. 1032-1041).
- 5. А.И.Ефимов, Л.А.Луканина, Л.Н.Самознаев, И.В.Чашей, М.К.Бёрд, Д.Плеттемейер. О пространственном распределении характеристик турбулентности во внутреннем солнечном ветре // Астрон. Журн. 2010. Т. 87. № 5. С. 492-502. (Astron. Rep. V.87. № 5. Р.446-455. 2010
- 6. А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Бёрд. Интенсивность флуктуаций частоты радиосигналов космических аппаратов в околосолнечной плазме // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 11. С. 1343-1349. (J. Comm. Techn. Electr. 2010. V. 55. № 11. Р. 1253-1259).
- 7. A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold & the MEX, VEX, ROS Radio Science Team. Quasi-periodic frequency fluctuations observed during coronal radio sounding experiments 1991-2009 // 38th COSPAR Scientific Assembly. 2010. 18-25 July. Bremen. Germany. D22-0044-10.

2.1.8. Мониторинга межпланетных и ионосферных мерцаний радиоисточников (ПРАО ФИАН и ИРЭ)

1)Проведена обработка данных трех серий круглосуточного мониторинга межпланетных и ионосферных мерцаний радиоисточников, выполненных с 18 ноября по 30 декабря 2006 г., с 11 по 18 июня 2007 г. и с 20 октября по 4 ноября 2008 г. в Пущинской Радиоастрономической обсерватории. Наблюдения выполнялись одновременно в 16 лучах диаграммы направленности радиотелескопа БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Регистрировались все источники с мерцающими потоками от 0.2 Ян и выше в пределах склонений от +3° до +10° при наблюдениях в 2006 и 2008 годах и от 21° до 28° при наблюдениях в 2007 году. Были измерены значения структурных функций флуктуаций потоков источников на временных лагах (задержках) 0.1секунды, 1 секунда и 10 секунд, которые характеризуют шумы(0.1 секунды), межпланетные (1 секунда) и ионосферные (10 секунд) мерцания радиоисточников. Каждый день наблюдалось порядка 1000 мерцающих радиоисточников. В качестве параметра, характеризующего межпланетную плазму, измерялась величина $N(\square_{\rm IPP} \square \square_{\rm IPP,0})$ - число мерцающих радиоисточником с мерцающими потоками П_{IPP} большими заданного потока и расположенных в площадке неба размером 8 градусов по склонению и 0.5 часа по прямому восхождению. Показано, что этот параметр пропорционален квадрату среднего индекса мерцаний ансамбля радиоисточников в данной площадке неба. Аналогичным образом был определен параметр $N(\Box_{\text{Ion}} \Box \Box_{\text{Ion.0}})$, характеризующий ионосферные мерцания. Определен суточный ход индекса межпланетных мерцаний. Наблюдались слабые вариации день ото дня индекса межпланетных мерцаний. В целом в период наблюдений межпланетная плазма и ионосфера находились в спокойном состоянии. По наблюдениям в 2008 г. в период очень глубокого минимума солнечной активности отмечена необычно слабая зависимость величины индекса мерцаний от положения радиоисточников относительно Солнца. Такая слабая зависимость объяснена сильной вытянутостью распределения турбулентной плазмы вдоль экваториальной плоскости [1].

2). Проведен анализ данных наблюдений межпланетных мерцаний для серии наблюдений в мае 2005 г. В период с 13 по 15 мая были зарегистрированы усиления мерцаний, связанные с прохождением выброса корональной массы. Сравнение данных по компактному радиоисточнику 3С 48, зондировавшего солнечный ветер на

гелиоцентрическом расстоянии около 0,4 а.е., и протяженному источнику 3С 20, зондировавшему солнечный ветер вблизи орбиты Земли на гелиоцентрических расстояниях более 0,8 а.е., позволило оценить среднюю скорость возмущения, которая оказалась около 1000 км/с. На экспериментальном материале показано, что источники больших угловых размеров более чувствительны к возмущениям: помимо значительного увеличения индексов мерцаний происходит резкое изменение формы временного спектра. Результаты включены в статью, подготовленную большим международным коллективом и опубликованную в журнале Solar Physics. [2]

3). Проведен анализ результатов наблюдений межпланетных мерцаний сильных радиоисточников 3С 298 и 3С 48 в период малой активности Солнца, выполненных на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Получены радиальные зависимости индексов мерцаний, которые оказались более пологими, чем следует ожидать, если модуляция связана с примыкающей к прицельной точке областью среды. Отличие объясняется влиянием низкоширотного гелиосферного токового слоя и соответствующим повышенным вкладом близких к Земле областей. По временным спектрам мерцаний определены значения скорости солнечного ветра и показано их хорошее согласие со значениями, найденными методом разнесенного приема. Это открывает реальную возможность систематических измерений скорости по наблюдениям на одиночном радиотелескопе. [3]

4). Проведен анализ данных экспериментов по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами японского космического аппарата NOZOMI, которые были осуществлены с декабря 2000 г. по январь 2001 г. Данные относятся к области гелиоцентрических расстояний от 13 до 37 радиусов Солнца. К анализу привлечены результаты измерений флуктуаций интенсивности и частоты принимаемого сигнала, которые были выполнены с высоким временным разрешением (~0.05 с для частоты и ~0.0065 с для интенсивности). На гелиоцентрических расстояниях менее 20 радиусов Солнца в спектрах флуктуаций частоты вблизи 1 Гц была обнаружена деталь, которая первоначально интерпретировалась как проявление внутреннего масштаба турбулентности. Однако более тщательное теоретическое рассмотрение не подтвердило такого объяснения. Как показано, уклонение спектра от степенного в ограниченной области частот связано со вкладом в спектр флуктуаций частоты амплитудных мерцаний. Найденные величины индекса мерцаний и дисперсии флуктуаций частоты уменьшаются с увеличением прицельного расстояния приблизительно по степенному закону и согласуются с теоретическими зависимостями. Анализ амплитудных флуктуаций с привлечением оценок скорости солнечного ветра, полученных методом разнесенного приема показал, что для гелиоцентрических расстояний меньших 25 солнечных радиусов, мелкомасштабные, размеры порядка 50 км, неоднородности вытянуты вдоль радиального коэффициентом анизотропии от 2.3 до 3.0. Для гелиоцентрических направления с расстояний более 30 солнечных радиусов неоднородности становятся близкими к изотропным. (Совместно с ИРЭ РАН) [4]

5). Выполнен большого объема флуктуациям анализ данных по частоты крупномасштабных монохроматических радиоволн, полученных В циклах радиозондирования околосолнечной плазмы, проводившихся с 1975 по 2002 год. По данным космических аппаратов ULYSSES и GALILEO получены радиальные зависимости дисперсии флуктуаций частоты дециметровых радиоволн, которые могут быть аппроксимированы степенными зависимостями, причем показатель степени оказывается различным в области ускорения солнечного ветра и в области установившегося течения. При учете радиального профиля для внешнего масштаба турбулентности из этих зависимостей следует, что относительный уровень флуктуаций концентрации солнечного

ветра не обнаруживает заметных изменений с гелиоцентрическим расстоянием. Получены радиально-широтные распределения для формы энергетического спектра турбулентности, внешнего и внутреннего масштабов турбулентности, подтвержден вывод о смене режима турбулентности при переходе из области ускорения солнечного ветра в область установившегося течения.(Совместно с ИРЭ РАН) [5,6]

6). В июне 2005 г. и июне 2007 г. (период вблизи минимума солнечной активности) были выполнены серии экспериментов радиопросвечивания внутреннего солнечного ветра поляризованными импульсами пульсаров PSR B0525+21 и PSR B0531+21. Наблюдения проводились на антенне БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Лучевые линии на пульсары приближались к Солнцу вплоть до гелиоцентрических расстояний около 5 радиусов Солнца. Проведенное сопоставление геометрии эксперимента со Стенфордскими данными о корональных магнитных полях, а также синоптическими картами STEREO SECCHI и SOHO EIT показывает, что полученные нами данные относятся к полярным корональным дырам. Радиальная зависимость средней концентрации плазмы, найденная по времени запаздывания импульсов пульсара PSR B0531 + 21, оказывается более сильной чем обратная квадратичная. Это позволяет сделать вывод, что ускорение потоков истекающего из корональных дыр быстрого высокоширотного солнечного ветра продолжается вплоть до расстояний 5-10 радиусов Солнца. Сравнение с данными аналогичных проведенных ранее наблюдений показывает, что в исследованной области гелиоцентрических расстояний и гелиоширот плотность плазмы солнечного ветра вблизи минимума солнечной активности существенно ниже, чем в период максимума. Абсолютный уровень турбулентности в зондировавшейся области околосолнечной плазмы был достаточно низким, что не позволило зафиксировать связанное с рассеянием в солнечном ветре уширение импульсов пульсаров при их сближении с Солнцем. [7]

1. V.I.Shishov, S.A.Tyul'bashev, I.V.Chashei, I.A.Subaev, K.A.Lapaev . Interplanetary and ionosphere scintillation monitoring of radio source ensemble at the solar activity minimum // Solar Phys. V.265. No.1-2. P.277-291.2010

2. M.M.Bisi, A.R.Breen, B.V.Jackson, R.A.Fallows, A.P.Walsh, Z.Mikic, P.Riley, C.J.Owen, A.Gonzalez-Esparza, E.Aguilar-Rodriguez, H.Morgan, A.G.Wood, M.Tokumaru, P.K.Maniharan, I.V.Chashei, A.Giunta, E.A.Jensen, J.A.Linker, V.I.Shishov, S.A.Tyul'bashev, S.K.Glubokova, M.S.Hamilton, J.M.Clover, K.Fujiki, S.E.Prise, B.Pinter, P.P.Hick, A.Buffington. From the Sun to the Earth: the 13 May 2005 Coronal Mass Ejection //Solar Physics V.265. No.1-2. P. 49-127.2010

3. Глубокова С.К., Глянцев 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 аэрономия, в печати

4. А.И. Ефимов, Т. Имамура, К.И. Ояма, К. Ногучи, Л.Н.Самознаев, А.С. Набатов, М.К.Бёрд, И.В. Чашей. Свойства турбулентности солнечного ветра по данным радиозатменных экспериментов с космическим аппаратом NOZOMI // Астрон. Журн. (Astron. Rep.) V.87. No.11. P.1120-1129

5. I.V.Chashei, V.I.Shishov, T.V.Smirnova. High Latitude Inner Solar Wind from Pulsar Radio Sounding Observations // Solar Phys. V.265. No.1-2. P.129-135. 2010

6. А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Бёрд. Интенсивность флуктуаций часитоты радиосигналов космических аппаратов в околосолнечной плазме. Радиотехника и электроника. Т.55. №11.С.1343-1349. 2010 (J. Comm. Techn. Electr. V.55. No.11. P. 1253-1259. 2010)

7. А.И.Ефимов, Л.А.Луканина, Л.Н.Самознаев, И.В.Чашей, М.К.Бёрд, Д.Плеттемейер. пространственном распределении характеристик турбулентности во внутреннем солнечном ветре. // Астрон. Журн. Т.87. № 5. С.492-502. 2010. (Astron. Rep. V.87. No.5. P.446-455. 2010)

8. A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold, S. Tellmann. Quasi-periodic fluctuations detected in MARS-EXPRESS coronal radio sounding observations // in: Solar-Wind-12. International Conference. AIP Conf. Proc. ed. by M. Maksimovic et al. 2010. V.1216. P. 90-93

2.2. Динамические процессы в межпланетной плазме

2.2.1. Мультипликативные и аддитивные свойства солнечного ветра. Статистическая модель солнечного ветра и межпланетного магнитного поля во внутренней гелиосфере (ИКИ и НИИЯФ МГУ).

Создана обширная база данных о физических параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля по опубликованным результатам прямых измерений за последние сорок лет. Выполнен ее анализ на предмет полноты, качества и однородности материала для последующего использования в статистических исследованиях. Предложены аналитические аппроксимации и определены параметры получающихся нормальных и логнормальных распределений. Установлены их доверительные интервалы. Сделан вывод о том, что логнормальные распределения в целом преобладают. Они возникают при множественных мультипликативных процессах в неустойчивых и диссипативных плазменных и магнитных структурах. Аддитивные случайные процессы не являются при этом главными. По этой причине нормальные гауссовские распределения в солнечном ветре, как правило, не наблюдаются. Модель представляет собой набор гистограмм, таблиц, графиков и формул, полученных на основе статистических исследований и апробированных теоретических представлений. Она может быть использована в научных и практических целях при постановке новых космических экспериментов для исследования солнечного ветра, при проектировании космических полетов, а также в образовательных целях для подготовки специалистов в области космофизики.

И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.В. Суворова. Статистическая модель солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. В книге «Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины» / под ред. В.А. Садовничего, А.И. Григорьева и М.И. Панасюка. Научное издание. - М.: Изд-во МГУ, 2010. – 344 с. / С. 193-220

И.С. Веселовский, А.В. Дмитриев, А.В. Суворова. Алгебра и статистика солнечного ветра, Космические исследования Т. 48, № 2, С.113-128, 2010

2.2.2. Изучение пространственной группировки резких и больших скачков потока ионов (плотности) солнечного ветра (ИКИ)

Эта тема рассматривается на основе сильной неравномерности распределения резких и больших скачков потока ионов солнечного ветра в систематических наблюдениях солнечного ветра на спутнике Интербол-1. Определены свойства областей солнечного ветра, в которых среднесуточное число таких скачков сильно возрастает. Проведено количественное моделирование этого явления.

Khabarova Olga, and Zastenker Georgy. Sharp changes in solar wind ion flux (density) within and out of current sheets (Submitted to Solar Physics)

Khabarova O., Zastenker G. Sharp changes of solar wind density as a possible sign of magnetic reconnection at current sheets. Доклад на 38-ой научной ассамблее КОСПАР, Бремен, Германия, 17 – 24 июля 2010г.

2.2.3. Исследование перемежаемости флуктуаций потока плазмы солнечного ветра и ММП ИКИ и НИИЯФ МГУ).

Продолжено изучение и теоретическое объяснение ряда особенностей динамики флуктуаций плазмы солнечного ветра и модуля магнитного поля в области ранее неизученных высоких частот (вплоть до 1 Гц). При этом установлены значительные вариации эксцесса функции распределения вероятности флуктуаций (показателя перемежаемости) в зависимости от условий в межпланетной среде.

Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Karavaev M.V. Intermittency of Solar Wind Ion Flux and Magnetic Field Fluctuations in the Wide Frequency Region from 10-5 up to 1Hz and the Influence of Sudden Changes of Ion Flux/ Proceedings of The Twelfth International Solar Wind Conference, CP1216, ed. By M. Maksimovic et al., pp.132-135, 2010.

Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Kalaev O.V. Intermittency of solar wind at the scale range till tens of Hz. Доклад на 38-ой научной ассамблее КОСПАР, Бремен, Германия, 17 – 24 июля 2010г.

2.2.4. Распространение солнечных космических лучей (ФТИ)

А) Показано, что в рамках моделей распространения солнечных космических лучей (СКЛ) в межпланетном пространстве, учитывающих диффузию частиц перпендикулярно магнитному полю, возможно объяснить различия во временных профилях событий СКЛ, при их наблюдении на далеко разнесенных по гелиоуглу космических аппаратах. Так, событие СКЛ 28 мая 1980 года, наблюдавшееся на аппаратах HELIOS 1 и IMP 8 было промоделировано при следующих параметрах распространения частиц: радиальная длина свободного пробега 0.2 а.е., отношение перпендикулярной длины свободного пробега к параллельной длине сводного пробега порядка 0.01.

С этой целью была создана модель, учитывающая кроме движения частиц вдоль силовой линии магнитного поля, также их перемещение перпендикулярно силовой линии магнитного поля Перемещение вдоль поля включало в себе, как просто размазывание по гауссовой плоскости перпендикулярно силовой линии, так и регулярный дрейф в случае пространственной зависимости коэффициента перпендикулярной диффузии. Движение вдоль силовой линии состояло из непосредственно движения вдоль линии с параллельной скоростью, а также анизотропной диффузии по питч-углу и фокусировки. Для протонов и ядер гелия также учитывались их адиабатические потери при распространении в расширяющемся солнечном ветре.

Эта модель даёт возможность получать временные профили частиц, которые наблюдаются на космических аппаратах, движущихся по различным произвольным траекториям. Так, известно, что при наблюдении одной и той же вспышки, но под разными углами, будут принципиально различаться временные профили. Чем дальше по углу находится космический аппарат, тем более сглаженными будут временные профили частиц солнечных космических лучей, ускоренных в этой вспышке.

Например, событие 28 мая 1980 г. наблюдалось на аппаратах HELIOS 1 и IMP 8. HELIOS 1 находился близко от источника (вспышки) на расстоянии 0.31 а.е. и 6 градусов от вспышки, а IMP – на радиальном расстоянии 1 а.е. под углом 46 градусов.

Удалось показать, что эти данные могут быть объяснены при отношении перпендикулярной диффузии к параллельной порядка 10⁻².

Б). Исследовано влияние показателя спектра турбулентности в области ускорения на возможное обогащение тяжелыми ионами солнечных космических лучей. Показано, что при показателях спектра турбулентности в области ускорения больше 2 возникают условия для дополнительного обогащения тяжелых ионов.

После наблюдения на космическом аппарате ACE значительных обогащений ионов тяжелее железа Reames, 2000; Mason et al., 2004; Mason, 2007) в импульсных событиях солнечных космических лучей, моделирование ускорения таких ионов стало чрезвычайно актуальным. Ранее зарядово-согласованное рассмотрение ионов ограничивалось теми из них, для которых были известны сечения изменения заряда (ионизации и рекомбинации). Это были ионы с зарядом ядра не более 30, т.е. для никеля. В работе Kartavykh et al., 2008 авторами была предложена методика для расчета сечений ионизации и рекомбинации для ионов с произвольным зарядом ядра и степенью ионизации. Были рассчитаны скорости ионизации и рекомбинации для ионов Kr, Te и Pb и промоделированы их зарядовые и энергетические спектры в результате стохастического ускорения. Для них были

исследованы случаи показателя спектра турбулентности в области ускорения S=1.5, 2, 2.5, 3. Во-первых, обогащение возможно в принципе при довольно больших значениях произведения характерного времени ускорения на концентрацию электронов фоновой плазмы - $(3-5)x10^{11}$ s cm⁻³. В случае S=1.5 в диапазоне энергии 0.3 – 0.5 MeV/nucleon превышение содержания наблюдалось только для Те и Pb. В случае S=2.5 и 3 наблюдалось значительное обогащение не только ионов тяжелее Fe, но и самого Fe. В случае S=2.5 при комбинированной области ускорения T=10⁶ K, Ta n = $3x10^{11}$ 90 % и Ta n = $5x10^{11}$ – 10 % получалось очень хорошее совпадение расчетных обогащений по сравнению с наблюдаемыми (Рисунок, по оси x – атомный номер элемента).



В). Моделирование бимодальных питч-угловых распределений электронов в событиях СКЛ, наблюдаемых на аппарате Wind. Было высказано предположение, что максимум в в питч-угловом распределении в направлении к Солнцу, связан с отражением электронов от головной ударной волны магнитосферы Земли. Было проведено моделирование распространения электронов СКЛ для события 4 июня 2000 года, учитывающее как прохождение электронов через ударную волну, так и их отражение от нее. Получено согласие на фазе, когда аппарат Wind находился на силовой линии межпланетного магнитного поля, проходящей также через головную ударную волну магнитосферы Земли.

Было рассмотрено прохождение электронов через ударную волну и их отражение при сохранении первого адиабатического инварианта. То есть питч-угол электронов менялся в соответствии с эти инвариантом. В случае наличия области сильной турбулентности за ударной волной (длина свободного пробега порядка нескольких радиусов Земли) удаётся получить бимодальное распределение, похожее на наблюдаемое..

W.Dröge, Y.Y.Kartavykh, B.Klecker, G.A.Kovaltsov. Anisotropic Three-Dimensional Focused Transport of Solar Energetic Particles in the Inner Heliosphere. The Astrophysical Journal, Volume 709, Issue 2, pp. 912-919. 2010. Ю.Ю.Картавых, В.Дреге, Б.Клекер, Г.А.Ковальцов,, Л.Кочаров, Э.Мебиус. Возможность обогащения СКЛ ионами тяжелее железа за счет влияния кулоновских потерь в области ускорения. Известия РАН, серия физ. Т. 75, № 5, 2011, в печати.

2.3. Роль малых ионных составляющих, нейтральной и пылевой компонент в динамике гелиосферы

2.3.1. Исследование химического и изотопного состава солнечного ветра (ФТИ)

1.Проведенные исследования направлены на выявление причин возможного изменения изотопного состава имплантированного солнечного излучения во времени в зависимости от температуры Решение этих проблем позволяет более корректно учитывать результаты

взаимодействия солнечного излучения с телами солнечной системы (метеориты, астероиды, космическая пыль поверхности планет, лишенных магнитосферы) на всех (в том числе на самых ранних и мало изученных) стадиях развития солнечной системы. И второе, позволяет оптимально организовывать необходимые условия хранения космического материала, который будет доставляться космическими аппаратами на Землю.

2. В качестве образца, при исследовании которого экспериментально решались обозначенные проблемы, был выбран образец лунного грунта, лоставленный автоматической станцией «Луна-24.». Исследован эффект диффузии изотопов гелия из образца лунного грунта (навеска 3.3 mg, фракция крупности < 74 μ m, глубина отбора пробы 118 ст в колонке грунта, доставленного автоматической станцией. Исследования проводились методом ступенчатого нагрева в диапазоне температур 300-1000 °С и массспектрометрического изотопного анализа гелия, выделенного на каждой температурной ступени. Показано, что диффузия не подчиняется классическим закономерностям Фика, что связано с большим числом радиационных нарушений в кристаллах минералов лунного грунта в результате облучения солнечным ветром; СКЛ; ГКЛ, и описывается формализмом, принятым для скачковой диффузии. Получено, что энергия активации диффузии для обоих изотопов гелия (4He и 3He) одинакова и равна 0.5 eV, а частотный фактор равен соответственно 0.51 и 0.59 s⁻¹.Случайные ошибки σ определения этих параметров примерно равны 5%. Доставленный лунный грунт во время земного хранения теряет гелий. Один грамм исследованного лунного материала в начале хранения при комнатной температуре ежесекундно теряет около 3 ·10⁹ атомов гелия и за 15 лет количество гелия в грунте уменьшается в 2 раза.. Обнаружен сильный изотопный эффект скачковой диффузии гелия: легкий изотоп ЗНе теряется в существенно большей мере. устранить потери гелия, сопровождаемые фракционированием изотопов, Чтобы доставляемый лунный грунт необходимо хранить при низкой температуре.

3. Примененный в эксперименте метод ступенчатого нагрева для исследований малого образца (~3.3 mg) при 8 различных температурах (диапазон 300 - 1000 ⁰C) возможно реализовать только при высокой чувствительности масс-спектрометрического изотопного анализа. Разработан специальный режим статической откачки камеры масс анализатора, который позволил проводить анализ газовой (гелиевой) пробы при однократном напуске малой порции гелия без какой-либо откачки масс анализатора вакуумными насосами в течение нескольких десятков минут до окончания времени анализа. Метод позволил поднять чувствительность более, чем в 1000 раз, и успешно завершить эксперименты без существенного расходования уникального лунного материала.

Г.С.Ануфриев. Эффект скачковой диффузии изотопов гелия из образцов лунного грунта//Физика твердого тела,2010,Т.52,№10, С.1921-1924

Г.С.Ануфриев, Э.М.Галимов. Потери гелия лунным грунтом//ДАН, 2008, Т.420, №6, С.805-807

Г.С.Ануфриев .Поток и изотопный состав древнего солнечного ветра//Космические Исследования, 2010, Т.48, №1.С.102-108

Г.С.Ануфриев, Б.С.Болтенков, А.И.Рябинков. Масс-спектры высокого разрешения в металлической вакуумной системе//Журнал технической физики. 2006, Т.76,№1,с. 105-114.

Г.С. Ануфриев, Б.С.Болтенков, Ф.В.Дубровский, В.П.Пименов, Е.И. Слюта, О.И.Яковлев. Моделирование процесса имплантации гелия в аналоги минералов лунного грунта//Вестник отделения наук о Земле РАН, 2009, №1(27). С 1-6

Г.С.Ануфриев. Статическая откачка масс анализаторов масс-спектрометров//Вакуумная техника и технология, 2009, Т.19, №4, С.227-230

2.3.2. Микроскопические пылевые частицы в атмосфере Земли (ИДГ)

На основе аналитических исследований и численного моделирования процессов в тропосфере, стратосфере и ионосфере Земли выявлены основные проявления нано- и микромасштабных частиц в околоземном пространстве. Описан механизм переноса

синоптическими вихрями нано- и микромасштабных частиц из тропосферы в нижнюю часть стратосферы. Показано, что возбуждение акустико-гравитационных вихрей на высотах 110-130 км в результате развития акустико-гравитационной неустойчивости, связанной с ненулевым балансом тепловых потоков, вызванных солнечным излучением, конденсацией паров воды, инфракрасным излучением в атмосфере, а также теплопроводностью, приводит к существенному перемешиванию и транспорту пылевых частиц на высотах 110-120 км. Продемонстрировано, что одним из способов переноса пылевых частиц в ионосфере являются вертикальные потоки (стримеры), которые формируются пылевыми вихрями результате развития параметрической В неустойчивости. Развита модель седиментации частицы в мезосфере, в которой учитывается ее зарядка в процессе взаимодействия с электронами и ионами окружающей плазмы, конденсация или испарение воды на поверхности частицы. Для этой цели, в частности, разработана теория процесса конденсации полярных молекул газа с дипольным моментом на поверхности нано- или микромасштабной частицы, обладающей зарядом и окруженной ионной атмосферой, позволяющая определить условия испарения/конденсации воды. Расчеты в рамках разработанной модели показывают, что эффективный рост нано- и микромасштабных частиц происходит при их падении до высот около 84 км, что находится в хорошем соответствии с наблюдениями серебристых облаков. Время существования пылевых структур в мезосфере определяется характерным временем эволюции пылевых частиц, которое оказывается приблизительно равным нескольким часам, что не противоречит данным наблюдений. Разработанная модель позволяет получить профили концентрации наномасштабных частиц, соответствующие наблюдениям серебристых облаков и полярных мезосферных радиоотражений.

S.I. Popel, Dusty plasma processes in Earth's environments containing nano- and microscale grains, Journal of Plasma Physics **76**, parts 3 & 4 (2010) 525-537.

S.I. Popel, Yu. N. Izvekova, and P. K. Shukla, Nano- and Microscale Particles in Vortex Motions in Earth's Atmosphere and Ionosphere, in: New Frontiers in Advanced Plasma Physics, Edited by B. Eliasson, P.K. Shukla, American Institute of Physics, Melville, New York (2010), pp. 189-200.

2.3.3. Воздействие заряженных микроскопических пылевых частиц на космическую погоду (ИДГ)

На основе анализа процессов в пылевой (комплексной) плазме в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, а также в межпланетном пространстве изучено влияние пылевых частиц на космическую погоду. Показано, что нано- и микромасштабные частицы участвуют в переносе вещества и энергии между магнитосферой, ионосферой и в нейтральной атмосфере Земли. Электрически заряженные микроскопические нано- и микромасштабные частицы из межпланетного пространства, ионосферы и магнитосферы Земли воздействуют на локальные свойства околоземной и межпланетной комплексной плазмы, влияя на процессы формирования облаков и пылевых структур, радиосвязь и эффекты, связанные с глобальным потеплением. Важными направлениями исследований по программе «Космическая погода» являются изучение процессов формирования структур, переноса вещества и энергии в комплексной плазме, а также изучение влияния нано- и микромасштабных частиц на диагностику ионосферной и космической плазмы, обнаружение загрязнителей окружающей среды, предсказания погоды на Земле и т.д. Будущие теоретические и лабораторные исследования пылевых частиц в комплексной плазме, объединенные с дистанционным зондированием и непосредственными наблюдениями в мезосфере, ионосфере, магнитосфере, солнечном ветре и солнечной атмосфере, должны привести к лучшему пониманию и лучшим предсказаниям космической погоды.

S.I. Popel, S.I. Kopnin, M.Y. Yu, J.X. Ma, Feng Huang, The Effect of Microscopic Charged Particulates in Space Weather, Journal of Physics D: Applied Physics **43** (2010), in press.

2.3.4. Потоки малоэнергичных ионов и магнитное поле на внутренней границе гелиосферы (ИКИ и НИИЯФ МГУ)

По данным космических аппаратов Voyager 1 и Voyager 2 проведено сравнение временных профилей интенсивности малоэнергичных ионов и величины магнитного поля в разные периоды солнечной активности во внешней гелиосфере. Показано, что временные, спектральные и статистические характеристики потоков частиц и магнитного поля в областях гелиосферы до и после терминальной ударной волны в 2002-2008 гг. имели схожую динамику в разных полусферах. Это подобие позволило предположить, что в области внутренней границы гелиосферы существовала квазистабильная пространственная структура, движущаяся вместе с терминальной ударной волной в соответствии с давлением солнечного ветра и также, возможно, под воздействием межзвездной среды. Было обнаружено, что пространственные размеры большинства деталей этой структуры меньше на V2, что, возможно, обусловлено изменением уровня солнечной активности, разницей в широте расположения космических аппаратов и также влиянием межзвездного магнитного поля.

И.С. Веселовский, М.А. Зельдович, Потоки малоэнергичных ионов и магнитное поле на внутренней границе гелиосферы, Космические исследования Т. 48, № 2, С.129-138, 2010

2.3.5. Сравнение плазменных процессов, для которых необходим одновременный учет нескольких или многих пространственно-временных масштабов в гелиосфере и магнитосферах планет (ИКИ)

Представлены общие и индивидуальные методы описания ламинарных и турбулентных ситуаций. На отдельных примерах показана важная роль геометрических условий, обеспечивающих присутствие или отсутствие универсальных сценариев и степенных спектров турбулентности.

Shaikh, Dastgeer; Veselovsky, I. S.; Lu, Q. M.; Zank, G. P., From Micro- to Macro-scales in the Heliosphere and Magnetospheres, eprint 2010arXiv1005.4899S

2.3.6. Анализ данных КА Interstellar Boundary Explorer (IBEX) (ИКИ)

Продолжена работа в рамках проекта NASA Interstellar Boundary Explorer (IBEX) по измерению энергичных атомов гелиосферного происхождения в диапазоне энергий от 200 эВ до 6 кэВ. Запуск КА IBEX был осуществлен осенью 2008 г., а в 2009 году были получены первые полные карты неба в потоках ЭНА (изображения неба в ЭНА). На картах неба была обнаружена узкая простирающаяся через все область, названная поясом ЭНА, потоки нейтральных энергичных частиц из которой в 2-3 раза превышают потоки из остальных областей. Анализ результатов кинетико-магнитогидродинамического моделирования показал, что положения пояса ЭНА хорошо коррелирует с кривой на гелиопаузе (контактной поверхности) ВДОЛЬ которой радиальная компонента межзвездного магнитного поля равна нулю. Таким образом, была показана корреляция положения пояса ЭНА с направлением и величиной межзвездного магнитного поля. Впервые было дано физическое объяснение обнаруженному поясу ЭНА. Для этого была разработана усовершенствованная модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Этой модели было сделано предположение (которое еще предстоит доказать или опровергнуть) об отсутствии рассеяния захваченных протонов в гелиопаузы. межзвездной среде в окрестности В данном предположении

модель позволяет объяснить данные КА IBEX не только качественно, но и количественно.

Chalov, S. V., Alexashov, D. B., McComas, D., Izmodenov, V. V., Malama, Y. G., Schwadron, N., Scatter-free Pickup Ions beyond the Heliopause as a Model for the Interstellar Boundary Explorer Ribbon, The Astrophysical Journal Letters, Volume 716, Issue 2, pp. L99-L102, 2010.

2.3.7. Моделирование нестационарных процессов в гелиосфере (ИКИ)

Проведены расчеты в рамках двумерной нестационарной кинетико-газодинамической модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой с учетом реальных данных измерений параметров солнечного ветра на 1 а.е. (космический аппарат OMNI) за последние три солнечных цикла (1933 - 2010 гг). Получены флуктуации расстояния до гелиосферной ударной волны и гелиопаузы для трех направлений – навстречу набегающему потоку межзвездной среды, Voyager 1 и Voyager 2. Показано, насколько близко к Солнцу приближается гелиосферная ударная волна и гелиопауза под влиянием аномально низкого динамического давления солнечного ветра в 2008-2009 гг. Показано, что в середине 2010 года гелиосферная ударная волна находилась на ближайшем (к Солнцу) расстоянии за последние (по меньшей мере) 3 солнечных цикла. Учитывая движение ударной волны в феврале 2010 года «Вояджер-1» находится внутри гелиошиса на 33 а.е., в «Вояджер-2» - на ~ 17 а.е. Дана оценка времени возможного пересечения гелиопаузы космическим аппаратом Voyager 2.

На основе двумерной нестационарной кинетико-газодинамической модели было рассмотрено распространение произвольного сильного модельного возмущения в сверхзвуковом солнечном ветре и его взаимодействие с гелиосферной ударной волной. Возмущение на 1 а.е. моделировалось резким произвольным увеличением параметров плазмы (плотности, скорости и давления) в течение некоторого периода времени (5-14 дней). Показано, что по мере распространения в сверхзвуковом солнечном ветре модельное возмущение эволюционирует в структуру, состоящую из передней (forward) ударной волны, обратной (reverse) ударной волны и тангенциального разрыва между ними, а также области разрежения. При распространении этой структуры в область гелиосферного ударного слоя, гелиосферная ударная волна совершает колебания около положения равновесия, двигаясь сначала в направлении от Солнца, затем приближаясь к Солнцу и затем возвращаясь в первоначальное положение равновесия.

Ргоvоrnikova E.A., V.V. Izmodenov, M.S. Ruderman, Y.G. Malama, Non-stationary plasma flow in the heliosheath, Генеральная ассамблея Европейского геофизического общества (EGU General Assembly), 2-7 мая 2010, Вена, Австрия, Сборник абстрактов, Vol. 12, № EGU2010-9738-1, 2010.

Проворникова Е.А., Рудерман М.С., Измоденов В.В., Малама Ю.Г., Нестационарные эффекты в области гелиосферного ударного слоя, Сб. тезисов конференции "Физика плазмы в солнечной системе", с. 49, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2010, Москва, 2010.

2.3.8. Исследование влияния эффектов границы гелиосферы на параметры межзвездных атомов водорода в межпланетном пространстве (ИКИ)

В 2010 году удалось завершить построение новой усовершенствованной кинетической модели для описания пространственного и скоростного распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере. В данной модели учитываются как локальные эффекты солнечной гравитации, радиационного отталкивания и ионизации, существенные на расстояниях до 20 а.е. от Солнца, так и глобальные эффекты, связанные с процессами, происходящими на границе гелиосферы, т.е. на расстояниях 150-200 а.е. от Солнца. В рамках данной модели решается кинетическое уравнение Больцмана для функции распределения атомов водорода по скоростям. На первом шаге при построении граничного условия использовалось трехмерное нормальное распределение, позволяющее учитывать все нулевые, первые и вторые моменты функции распределения атомов

(Катушкина, Измоденов 2010). Однако, такое представление не учитывает асимметрию функции распределения относительно максимума, вызванную кинетическим эффектом селекции. Поэтому в окончательной версии модели мы применили иной подход. А именно, функция распределения вторичных межзвездных атомов на 90 а.е. вычислялась с помощью метода Монте-Карло в самосогласованной кинетико-газодинамической модели (Baranov, Malama 1993), а затем переносилась В граничное условие ЛЛЯ усовершенствованной горячей модели. Сравнение наших результатов с результатами «классической» горячей модели показало, что эффекты гелиосферного интерфейса особенно существенно влияют на зависимость кинетической температуры Тг в радиальном направлении от гелиоцентрического расстояния. На рис.1 показаны графики этой зависимости для трех различных моделей: красный цвет - самосогласованная кинетико-газодинамическая модель гелиосферного интерфейса (Baranov, Malama 1991); синий цвет – «классическая» горячая модель; черный цвет – усовершенствованная горячая модель. Видно, что модели, учитывающие эффекты гелиосферного интерфейса приводят к качественно другим результатам по сравнению с упрощенной классической горячей моделью.



Рис.1. Зависимость радиальной температуры от расстояния в направлении навстречу (А) и перпендикулярно (В) набегающему потоку. Разные цвета соответствуют разным моделям (см. текст).

Катушкина О.А., Измоденов В.В., Влияние эффектов гелиосферного интерфейса на распределение параметров атомов межзвездного водорода внутри гелиосферы, Письма в Астрон. Ж., том 36, № 4, стр. 310-319, 2010.

Измоденов В.В., Катушкина О.А., Чалов С.В., Алексашов Д.Б., Малама Ю.Г., Рудерман М.С., Граница гелиосферы: глобальная структура, межэвездные атомы, энергичные нейтральные атомы, опубликовано в сб. «Инновационные решения для космической механики, физики, астрофизики, биологии и медицины» под ред. В.А.Садовничего, А.И.Григорьева, М.И.Панасюка; стр. 193-222, Издательство Московского университета, Москва 2010.

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

Взаимодействие холодного нейтрального межзвездного облака и горячей плазмы рассматривалось в рамках двухжидкостной модели. Нейтральные атомы водорода межзвездного облака взаимодействуют с протонами окружающей плазмы в процессе перезарядки. Облако предполагается сферически-симметричным. Результаты были получены для двух случаев – адиабатического и изотермического течения плазменной компоненты в области взаимодействия. Численные расчеты были проведены при различных значениях определяющих параметров, в частности, для Локального межзвездного облака с параметрами $n_{\rm H}$ = 0.25 см⁻³, $T_{\rm H}$ = 7000 K, окруженного горячей плазмой Локального пузыря $n_{\rm p}$ = 0.0009 см⁻³, $T_{\rm p}$ = 10⁶ K.

В рамках адиабатической модели были получены следующие результаты: 1) Процесс перезарядки атомов водорода облака и протонов окружающей плазмы приводит к

формированию переходной области на границе облака; 2) концентрация плазмы максимальна на границе облака; 3) Внутри облака нейтральный газ покоится, на границе в переходной области скорости обеих компонент уменьшаются вследствие обмена импульсом при перезарядки; 4) Нейтральное облако не испытывает нагрева и остается холодным в течение всего времени взаимодействия; 5) В течение длительного времени после начала взаимодействия граница облака остается практически неподвижной. 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 в рамках 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.

Проворникова Е.А., Алексашов Д.Б., Измоденов В.В., "Газодинамическое моделирование взаимодействия нейтральных межзвездных облаков с окружающей их горячей плазмой", сб. «Актуальные проблемы механики», с.125-150, ИПМех РАН, Изд-во «Наука» Москва, 2011.

2.3.10. Моделирование фрагментации околозвездной оболочки и межзвездных облаков (ИКИ)

Проведено математическое моделирование роста двумерных возмущений движения нейтральной оболочки, формируемой в межзвездной среде при выходе ионизационноударного фронта на поверхность облака. Найдено, что фрагментация оболочки сопровождается сверхзвуковым фонтанированием горячей плазмы в среду низкой плотности. По мере удаления от фронта ионизации концентрация заряженных частиц меняется слабо, что не согласуется с часто используемым при интерпретации наблюдений степенным законом убывания плотности с ростом расстояния от центра конденсации.



Рис.1 Фрагментация околозвездной оболочки. Изотермы (), изохоры (), изолинии степени ионизации () в два последних момента времени. (Температура отнесена к 10⁴ К, плотность к начальной плотности в области HII; температура звезды 3.9^{-10⁴}К)

Рассмотрен вопрос количественной интерпретации наблюдательных данных о структуре межзвездной среды (в остатках сверхновых, в сверхзвуковом звездном ветре и т.д.). Проведены двумерные расчеты ускорения облака плотного газа под действием плоской ударной волны. Исследована морфология уплотнений за ударной волной в зависимости от начальных параметров облака. Найдено, что на эволюцию уплотнений существенно влияет геометрическая форма облака и масштабы возмущений его поверхности.



Рис.2 Морфология межзвездной среды за ударной волной: (а)- оптическое и рентгеновское (линии) изображение G74.0-8.5 Cygnus Loop; (б) - расчет развития возмущений плотного слоя (изохоры).

Котова Г.Ю., Краснобаев К.В., Численное моделирование неустойчивых двумерных движений фотоиспаряемой околозвездной оболочки, Письма в Астрономический журнал, 2010, т. 36, № 7, с. 506-516. Тагирова Р.Р., Расчет поля скоростей в неоднородном газовом слое при прохождении через него излучающей ударной волны, VII конф. молодых ученых. "Фундаментальные и прикладные космические исследования", Тезисы докладов, М.: ИКИ РАН, 2010. С. 58

2.3.11. Волновые движения частично ионизованной плазмы (ИКИ)

Рассмотрены волновые движения частично ионизованной плазмы, тепловое состояние которой определяется поглощением ультрафиолетового излучения внешнего источника и высвечиванием в линиях примесных ионов. В приближении слабой нелинейности установлено влияние характерных масштабов возмущений на дисперсию волн. Для функций нагрева и охлаждения частного вида проведено численное интегрирование системы уравнений газовой динамики без ограничений на величину амплитуды волны. Свойства волновых движений в областях НІІ представляют интерес при интерпретации структурной функции наблюдаемых нерегулярностей скорости плазмы. Так, ранее в приближении слабой нелинейности было установлено, что нелинейные эффекты существенны лишь для длинноволновых возмущений, масштабы которых сопоставимы с размером области изменения структурной функции. В то же время на переносе энергии по спектру существенно сказывается обусловленное радиационным охлаждением затухание волн и структурная функция в соответствии с наблюдениями не следует универсальным законам турбулентности. Эти выводы подтверждены непосредственными расчетами на основе полной системы уравнений радиационной газовой динамики, включающей перенос излучения и кинетику радиационных процессов. О влиянии дисперсии и затухания на эволюцию возмущений дают представление графики на рис. 1 и 2, соответствующие распространению волн в однородной неподвижной среде и в расширяющейся области НІІ.



Рис. 1 Изменения со временем скорости газа u(x,t) для различных длин волн L в однородной среде (скорость отнесена к скорости звука a_s , координата x и время t выражены соответственно в единицах длины охлаждения L_c и L_c/a_s)



Рис. 2 Эволюция возмущений в расширяющейся области НІІ для L=0.1 и L=0.05 (температура отнесена к 10⁴К, плотность к плотности в области НІІ в начальный момент времени)

Г.Ю. Котова, К.В. Краснобаев, Эфекты дисперсии при распространении нелинейных и ударных волн в газе с теплоподводом от внешних источников, Материалы XXXIУ академических чтений по космонавтике «Актуальные проблемы российской космонавтики», С. 40, 2010.

Г.Ю. Котова, К.В. Краснобаев, Аналитическая теория и численное моделирование распространения нелинейных волн в околозвездном газе. Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения», Секция механики, Москва, С. 114, 2010.

2.1.12. Расчеты автоволновых режимов в газо-пылевой среде (ИКИ)

Впервые исследовано влияние применяемых численных методов на расчет автоволновых режимов распространения волн в околозведном молекулярном водороде с пассивной примесью пыли и окиси углерода. Установлено, что расчеты с использованием наиболее употребительным разностных схем дают согласующиеся между собой значения амплитуды в режиме насыщения. Однако профили газодинамических параметров могут значительно отличаться.

К.В. Краснобаев, Р.Р. Тагирова, Автоволны в газо-пылевой излучающей среде, Тезисы докладов научной конференции «Ломоносовские чтения», Секция механики, Москва, С. 115, 2010.

2.3.13. Исследование устойчивости самогравитирующего газа (ИКИ)

Исследованы процессы установления равновесия в плоском слое самогравитирующего газа. Установлено два характерных режима движения. Первый соответствует выходу плотности на стационарное распределение. Второй, как показывают расчеты и аналитические оценки, сопровождается увеличением плотности на несколько порядков – в пределе до бесконечности.

С. И. Арафайлов, К.В. Краснобаев, Р.Р. Тагирова. «Особенности установления стационарных режимов течения газа в поле тяжести». Материалы Всероссийской конференции «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра (НЕА-2010)», Москва, 2010.

2.4. Торможение и турбулизация солнечной плазмы вблизи планет и тел солнечной системы

2.4.1. Исследование вариаций плазмы и магнитного поля в магнитослое (ИКИ).

По данным наблюдений на спутнике Интербол-1 с высоким временным разрешением продолжена разработка выдвинутой нами гипотезы о сложной структуре магнитослоя, в которой выделяются постшок, переходная область и внутренний магнитослой.

По вариациям измерений потоков плазмы и параметров магнитного поля изучена динамика этой структуры при различной ориентации ММП.

Чугунова О.М., Пилипенко В.А., Застенкер Г.Н., Шевырев Н.А. Пространственная структура турбулентного магнитослоя, Космические исследования (в печати).

Чугунова О.М., Пилипенко В.А., Застенкер Г.Н., Шевырев Н.А., Зависимость параметров поля и плазмы в магнитослое Земли и в солнечном ветре вблизи ударной волны от направления межпланетного магнитного поля, Космические исследования (направлена в печать).

2.4.2. Затухание солнечных квазиударных волн. Обратная ударная волна солнечного ветра как нелинейный МГД процесс в межпланетной плазме (ГАО)

Задачей данного исследования являлось доказательство того факта, что обратный тип МГД ударных волн может генерироваться внутри магнитослоя перед планетарной магнитосферой (Земли, Марса, Юпитера) в результате нелинейного опрокидывания обратной МГД волны сжатия. В силу существования физической аналогии между планетарной магнитосферой и магнитным облаком решение поставленной задачи во многом применимо и к рассмотрению возникновения подобных процессов в потоке солнечного ветра у границы магнитного облака, движущегося по стационарному потоку солнечного ветра.



Схема движения волн в магнитослое на плоскости *x*, *t*.

На рисунке приведена схема движения волн внутри магнитослоя перед магнитосферой Земли. Здесь используются обозначения: *x* – расстояние, а *t* – время.

Сплошная линия отражает движение ударной волны; R_5 , R_8 , R_9 – волны разрежения, S – МГД волна сжатия или ударная волна, S_2 – ударная волна солнечного ветра, S_1 , S_3 , S_7 – фронт носовой ударной волны, C_m - магнитопауза, δ – толщина магнитослоя, T – тангенциальный разрыв.

Имеются данные космических аппаратов типа Cluster, свидетельствующие о резких изменениях скорости головного ударного фронта перед магнитосферой Земли во время геомагнитных возмущений. Подобные явления непосредственно указывают на возможность влияния волн сжатия типа прямой и обратной ударных волн на систему головная ударная волна – магнитосфера Земли.

Основные результаты данного исследования сводятся к следующему:

1. Показано возникновение обратной МГД ударной волны внутри магнитослоя в результате нелинейного опрокидывания быстрой нелинейной МГД волны сжатия, отражённой от магнитопаузы:

$$s \rightarrow S$$
 и $\$ \$' \rightarrow \$ 2 T \$'$

s – МГД волна сжатия, отражённая от магнитопаузы; *S* – новая обратная ударная волна; *R* - вторичная волна разрежения, возникшая в результате столкновения двух ударных волн; *T*- тангенциальный разрыв. Рассмотренный процесс будет повторяться с уменьшенной интенсивностью.

2. Предполагается, что обратное (направленное к Солнцу) смещение фронта носовой ударной волны, наблюдаемое на космическом аппарате Cluster SC3, указывает на воздействие обратной ударной волны, возникающей в магнитослое.

3. Вторичная волна разрежения делает профиль возмущения геомагнитного поля SSC мене резким, что действительно наблюдалось ещё на космическом аппарате OGO 3.

Выступления на Всероссийских и международных конференциях.

- 1. Доклад на Всероссийской конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2010 года)
- 2. Доклад на VIII международной конференции «Проблемы Геокосмоса» (Санкт-Петербург, Петродворец, СПбГУ, 20-24 сентября 2010 года)
- Пленарный доклад на Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2010» (СПб, ГАО РАН, 3-9 октября 2010 года)

Опубликованные работы.

- 1. С.А.Гриб, О догонном взаимодействии типичных ударных волн в потоке солнечного ветра. **Письма в Астроном.журнал**, 2010, т.36, №1, стр.61-65.
- 2. S.A.Grib, E.A.Pushkar. Some features of the interplanetary shock wave interactions connected with the thermal anisotropy and 3D flow past the Earth' bow shock. **Planetary and Space Science**, v.58, 14-15, 2010, pp.1850-1856. doi:10.1016/j.pss.2010.08.015.
- 3. Grib S.A., On the generation of the interplanetary reverse waves inside the terrestrial magnetosheath. Proceedings of the 8th International Conference "Problems of Geocosmos", Saint-Petersburg, Petrodvorets, Sept.20-24,2010, pp.100-104.
- С.А.Гриб, Может ли обратная ударная волна возникать в солнечном ветре в магнитослое перед магнитосферой Земли? Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2010» (СПб, ГАО РАН, 3-9 октября 2010 года), СПб, ГАО РАН, 2010. стр.115-118

2.4.3. Модель входа кометного тела в земную атмосферу (ФТИ)

Обоснована модель входа кометного тела в земную атмосферу, согласно которой объект начинает взаимодействовать с атмосферой взрывным образом на высоте около 1000 км, что многократно выше высоты появления метеоров и с этих позиций рассмотрены эффекты, связываемые с воздействием Тунгусского события 1908 года на земную атмосферу, обусловлены кометной природой этого явления.

Проведенный анализ наблюдений летящего объекта на территории радиусом ≥700 км позволяет утверждать, что Тунгусское космическое тело имело диаметр светящейся области ≥10 км и стало видимым на высотах >500 км. Это опять говорит в пользу кометной природы Тунгусского события, поскольку размер комы определяется только

плотностью окружающего воздуха. Чем более разрежен воздух, тем дальше разлетаются частицы с поверхности тела, следовательно, тем большего размера достигает кома.

Существует гипотеза, согласно которой кометы взрываются в земной атмосфере на высотах ~ 1700 км [Frank et al.,1986]. Только с помощью этой гипотезы о взрывном взаимодействии комет с атмосферой удается объяснить ряд экспериментальных фактов, обнаруженных в процессе исследования космического пространства.

Во всех точках наблюдения закатов после Тунгусской катастрофы, расположенных вне зоны облачности, отмечались насыщенные красные, оранжевые или желтые (иногда все вместе) тона. Необыкновенная яркость этих цветов была подобная той, что наблюдают космонавты на орбите (Рисунок). Путь, пройденный солнечными лучами в земной атмосфере до пилотируемого корабля, существенно превышает путь света до наблюдателя на земле. При отражении света от поля серебристых облаков после катастрофы путь солнечных лучей в земной атмосфере также оказался значительно увеличен. По закону Рэлея красная окраска источника света будет тем более насыщенной, чем толще слой атмосферы, пройденный лучом. Именно поэтому после Тунгусской катастрофы цвет закатов показался столь необычным и впечатляющим.



Рисунок. Сумеречный ореол: *a* – после Тунгусской катастрофы; *б* – при наблюдениях из космоса. Обозначения: *l* – красный цвет; *2* – оранжевый; *3* – желтый; *4* – белый; *5* – зеленый; *6* – голубовато-белесый; *7* – голубой; *8* – синий; *9* – темно-фиолетовый.

Представленная в работе модель объясняет: 1) аномальное свечение атмосферы летом 1908 года, 2) возникновение зоны ускоренного роста деревьев, протянувшейся до Северного Ледовитого океана и 3) наблюдения очевидцев о существенном потемнении, имевшем место после пролета тела.

О.Г.Гладышева. Атмосферные аномалии лета 1908 г.: вода в атмосфере. // Геомагнетизм и аэрономия 2011а (принято в печать).

О.Г.Гладышева. Атмосферные аномалии лета 1908 г.: свечение неба. // Геомагнетизм и аэрономия 2011б (принято в печать).

3. Динамика магнитосфер Земли и планет

3.1. Передача энергии и импульса от солнечного ветра в магнитосферу

3.1.1. Исследование зависимости геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений (ИКИ)

На основе «Каталога крупномасштабных течений солнечного ветра за период 1976 – 2000 г» (<u>ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/</u>), созданного нами с помощью базы OMNI, были проанализированы корреляционные связи между интенсивностью кольцевого и аврорального токов (геомагнитных индексов *Dst* и *AE*) на пике главной фазы и основными параметрами солнечного ветра: *Ey* компонентой электрического поля солнечного ветра, динамическим давлением *Pd*, и (3) уровнем магнитных флуктуаций σB MMП.

Анализ сделан для 8-ми категорий магнитных бурь с Dst≤-50 нT, источником которых являлись следующие типы течений солнечного ветра: коротирующие области взаимодействия CIR – 86 бури, магнитные облака MC – 43 бури, области сжатия перед магнитными облаками Shмc - 8, поршни Ejecta – 95, области сжатия перед поршнями Shejecta – 56, все межпланетные корональные выбросы MC+Ejecta – 138, области сжатия перед ними Shмc+Shejecta – 64, и события неопределенного типа IND – 75 бурь.

Использование метода сопоставления «пиковых» значений *Ey* и |*Dst*| позволило получить следующие результаты:

- почти для всех типов солнечного ветра, кроме MC и MC+Ejecta, связь между индексом |*Dst*| (*Dst* в минимуме главной фазы) и электрическим полем *Ey* хорошо аппроксимируется линейной зависимостью с высоким коэффициентом корреляции (>0.6).

- только для бурь, связанных со структурами МС и МС+Ејесta, индекс |*Dst*| выходит на насыщение при больших значениях поля *Ey*>11 мВ/м, что, возможно, связано с нелинейностью процессов взаимодействия солнечного ветра с ионосферно-магнитосферной системой при сильных электрических полях.

- в то время как для областей сжатия CIR и ShMC+ShE индекс |Dst| линейно растет с ростом электрического поля Еу во всем диапазоне изменения поля Еу, вплоть до высоких значений 15 и 23 мВ/м, соответственно.

- на фоне зависимости максимального |Dst| индекса от поля *Ey* величина |Dst| индекса, повидимому, не зависит от величины динамического давления *Pd* и от уровня флуктуаций σB ММП, или эта зависимость слабая.

- для всех типов течений, кроме MC и ShMC, интенсивность аврорального тока (AE индекс) не зависит от величины электрического поля Ey (низкий коэффициент корреляции r<0.5). На фоне поведения AE индекса при изменении Ey интенсивность аврорального тока не зависит от величины динамического давления Pd в и от уровня флуктуаций σB MMП.

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 Аэроном. №1. 2011. том 51. № 1. С. 1–17.

3.1.2. Анализ динамики развития главной фазы магнитных бурь с *Dst*≤−50 нT с разным типом источника в солнечном ветре и получены оценки пороговых критериев для достижения уровня интенсивности умеренных (*Dst*≤−50 нT) и сильных (*Dst*≤−100 нT) бурь (ИКИ)

Так как *Dst* индекс зависит не только от текущего значения поля *Ey*, но от предыдущих значений, т.е. от длительности воздействия *Ey*, то был сделан анализ динамики изменения *Dst* индекса при изменении суммарного (интегрального) электрического поля *sumEy* во время главной фазы бурь с разным типом солнечного ветра. На фоне этой основной зависимости было исследовано возможное влияние динамического давления солнечного ветра *Pd* и вариаций σB ММП на величину *Dst* индекса во время развития главной фазы бури.

Анализ развития главных фаз 190-ми магнитных бурь умеренной и сильной интенсивности, источником которых являлись 8 разных типов течений солнечного ветра:

МС (17 бурь), CIR (49 бурь), Ejecta (50 бурь), ShE (34 бури), ShMC (6 бурь), ShE+ShMC (40 бурь), MC+Ejecta (67 бурь), IND (34 бури), позволил получить следующие результаты: - на главной фазе всех типов бурь *Dst* индекс хорошо аппроксимируется линейной зависимостью от интегрального электрического поля *sumEy* с высоким коэффициентом корреляции для всех точек фазы (меняется от rl=-0.66 для MC и CIR до rl=-0.78 для ShMC + ShE).

- по сравнению с предыдущей работой [Николаева и др., 2011] коэффициенты корреляций между *Dst* и *sumEy* ниже, чем для пиковых значений *Dst* и *Ey*, что возможно связано с влиянием длительности главной фазы на величину интегрального поля *sumEy* и учетом влияния малых значений *Ey* на *Dst* на начальной стадии развития бури.

- можно предположить, что высокое динамическое давление как бы усиливает эффективность электрического поля для 4-х типов течений: областей сжатия (ShE, ShE+ShMC), коротирующих областей взаимодействия CIR и неопределенного типа IND. Для этих типов интенсивность кольцевого тока во время развития главной фазы бури (*Dst* понижение) сильнее растет в подгруппе с высоким динамическим давлением Pd > P0, чем в подгруппе с низким давлением $Pd \le P0$. Для 4-х других типов бурь, связанных в основном с событиями ICME (MC, Ejecta, ShMC, MC+Ejecta) зависимость *Dst* от давления Pd на фоне зависимости от *sumEy* не наблюдается.

- на фоне зависимости *Dst* от *sumEy* главной фазы бури почти для всех типов течений не наблюдается зависимость от уровня флуктуаций σB ММП (различия в пределах разброса при сравнительно небольшом диапазоне изменения параметра σB ММП).

- для всех типов пороговая величина интегрального электрического поля сильных бурь примерно в 3 раза больше, чем для умеренных бурь. Оценки пороговых значений интегрального электрического поля *sumEy* для достижения уровня интенсивности умеренных ($Dst \leq -50$ нT) и сильных ($Dst \leq -100$ нT) бурь указывают на тенденцию их зависимости от типа источника магнитной бури. Можно предположить, что, в среднем, области сжатия перед межпланетными СМЕ имеют пороговые значения в 1.5 раза ниже, чем сами межпланетные СМЕ.

- для умеренных бурь самый низкий пороговый уровень (*sumEy* =9 мВ м-1 ч) имеют области сжатия ShE и ShMC+ShE, в то время как их тела Еjecta и MC+Ejecta имеют пороговый критерий в ~1.5 раза выше (*sumEy* =12 мВ м-1 ч). Самая большая величина порогового критерия умеренных бурь у событий MC, CIR, IND (*sumEy* =14 мВ м-1 ч) и ShMC (*sumEy* =13 мВ м-1 ч).

- для сильных бурь самое низкое пороговое значение имеют области сжатия ShE, ShMC, ShMC+ShE (*sumEy* =29, 32, 32 мВ м-1 ч, соответственно). В то время как для «тел» Ејесtа, MC, MC+Ejecta пороговый критерий сильных бурь в ~1.5 раза выше, чем для области сжатия (*sumEy* =40, 45, 41 мВ м-1 ч, соответственно). События CIR имеют пороговый критерий сильных бурь, близкий к областям сжатия (*sumEy* =39 мВ м-1 ч).

Н.С. Николаева, Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений . 2. Развитие бури // Геомагнет. и Аэроном. 2011 (в печати)

3.1.3. Исследована роль вариации параметров межпланетной среды в генерации магнитных бурь разными типами солнечного ветра (ИКИ)

Исследуется поведение средних значений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) и их абсолютных и относительных вариаций во время магнитных бурь, генерированных различными типами солнечного ветра. На основе архива данных OMNI для периода 1976–2000 годов выполнен анализ 798 геомагнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТ и их межпланетных источников: коротирующих областей взаимодействия CIR, областей сжатия Sheath перед межпланетными CME; магнитных облаков MC; "поршней" Еjecta, и неопределенного типа источника. Для анализа был использован двойной метод

наложенных эпох, в котором за опорные времена взяты моменты начала магнитной бури и минимума *Dst* индекса. Показано, что совокупность межпланетных источников магнитных бурь по своим медленно и быстро изменяющимся характеристикам разбивается на две основные группы: (1) ICME (MC и Ejecta) (2) CIR и Sheath. Средние значения, абсолютные и относительные вариации в MC и Ejecta для всех параметров оказываются или средними, или ниже среднего (средние значения электрического поля *Ey* и *Bz* компоненты ММП по модулю выше), а в CIR и Sheath – выше среднего. Высокие значения относительных вариации *sN*/<*N*> наблюдаются в MC. В тоже время высокие значения для относительных вариаций скорости, *Bz* компоненты и модуля MMП наблюдаются в Sheath и CIR. Заметных различий в соотношениях рассматриваемых параметров для средних и сильных магнитных бурь не наблюдается.

Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев, Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури. 2. Вариации параметров, Космические исследования, 2011, том 49, № 1, с. 1–14 (в печати)

Yermolaev, Yu. I.; Nikolaeva, N. S.; Lodkina, I. G.; Yermolaev, M. Yu.Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis, Annales Geophysicae, Volume 28, Issue 12, 2010, pp.2177-2186

3.1.4. Динамика потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите (ИКИ)

По данным интенсивности потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите за период с 1986 по 1995 гг, установлено, что в низкочастотной части спектра флуктуаций потока релятивистских электронов имеется увеличение мощности спектра флуктуаций на двух частотах соответствующих периодам около 26 и 30 дней. Учитывая дифференциальное вращение Солнца, предполагается, что изменения интенсивности потока релятивистских электронов (Е > 2 МэВ) на геостационарной орбите с данными периодами связаны с вариациям скорости солнечного ветра, вызванными проявлением активности Солнца на двух различных гелиоширотах.

Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А. и др. Радиационные условия на геостационарной орбите. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010, том. 117. № 4, с. 35-41.

3.1.5. Особенности солнечной активности в 23-м цикле и их проявление в климатических параметрах (ИКИ)

Проанализирована эволюция корреляции между числом солнечных пятен (ЧСП) и различными показателями солнечного излучения – составляющими солнечной постоянной ACRIM и PMOD, индексами F10.7, MgII и HeI 1083, а также рассмотрено изменение независимого показателя солнечной активности – глобально усредненной критической частоты среднеширотного ионосферного слоя F2 за три последних солнечных цикла. Показано, что 23-й цикл имел два максимума, в 2000 и 2002 гг., и их амплитуда по-разному описывалась солнечными индексами. Первый максимум был выше в ЧСП, а второй – в индексах, описывающих излучение. Рассогласование в индексах и отклонение их от многолетней линии регрессии с ЧСП началось после значительного повышения солнечного УФ в течение 3-4 месяцев конца 2001-начала 2002 г. (т. е. в период южного лета и максимальной асимметрии между полушариями). Показано, во время этого солнечного явления или непосредственно после него отмечались аномалии во многих климатических параметрах по всей толще атмосферы Земли, в частности, в температурном режиме полушарий, в полугодовой осцилляции экваториального зонального ветра в верхней стратосфере, ширине тропического пояса, озонном слое и ледовом режиме Антарктики.

Получены соотношения между среднечасовыми значениями приземного электрического поля на станции Восток (Ez) и потенциалом ионосферы над станцией (Uext) Анализ проведен как на примере отдельных дней, так и на всей выборке дней «хорошей погоды» за 1998-2000 гг. Для определения ионосферного потенциала применялись модели конвекции [Weimer 1995] и [Lukianova and Christiansen, 2006], а также данные системы радаров SuperDARN в Антарктике. Показано, что существует значимая корреляция между Ez и Uext. Профиль суточного хода общего коэффициента корреляции (R) между Ez и Uext отражает возможности адекватного описания структуры эквипотенциалей с помощью моделей крупно-масштабной конвекции. В зависимости от ориентации межпланетного магнитного поля (ММП) общая тенденция состоит в повышении R при переходе от By<0 к By>0. Этот факт объясняется асимметрией картин конвекции при противоположных знаках By.

Lukianova R. and K. Mursula, Changed relation between sunspot numbers, solar UV/EUV radiation and TSI during the declining phase of solar cycle 23, J. Atmos.Solar-Terr.Phys., (in press).

Lukianova R. and G. Alexseev, High solar irradiance episode in 2001/2002 and relevant Earth's climate anomalies, J. Earth System Science (in press).

Лукьянова Р. Ю., А. В. Круглов, А. В. Франк-Каменецкий, А. Л. Котиков, Г. Б. Бернс, В. Д. Р. Френч, Соотношение между потенциалом ионосферы и приземным электрическим полем в южной полярной шапке, Геомагнетизм и аэрономия (принято в печать)

3.1.6. Экспериментальное обнаружение и теоретическое описание направленного к Земле электростатического поля в хвосте магнитосферы (ИКИ)

Квазистационарное электрическое поле внешней магнитосферы Земли определяет глобальную конвекцию плазмы, но слишком мало, что бы быть зарегистрированным прямыми методами. Наблюдения многоспутникового проекта Cluster позволили выделить в хвосте магнитосферы новую, ранее неизвестную, компоненту такого электрического поля, направленную к Земле и создающую средний азимутальный дрейф плазмы с вечерней стороны на угреннюю. Для получения оценок величины поля использовалось два независимых метода. (1) По разности измеряемых потоковых скоростей электронов и электронных дрейфов, связанных с кривизной силовых линий и градиентом давления. (2) По дрейфам холодного ядра и горячих флангов функции распределения ионов. Величина поля составляет порядка 0.1-0.2 мВ/м, что не позволяет измерить её прямыми методами в хвосте земной магнитосферы. Полученные оценки согласуются с построенной теоретической моделью, в которой возникновение рассматриваемого электрического поля обусловлено различием в движении незамагниченных квазиадиабатических ионов и замагниченных электронов в тонких токовых слоях со слабо-двумерной геометрией. Построенная модель и экспериментальные оценки позволяют также объяснить важный и остававшийся до последнего времени неясным эффект наблюдения сильных электронных токов в токовых слоях хвоста магнитосферы. За счёт наличия данной компоненты происходит перестройка токовой системы, в результате которой электронный ток становится существенно больше тока, переносимого ионами.



Zelenyi, L. M., A. V. Artemyev, and A. A. Petrukovich, Earthward electric field in the magnetotail: Cluster observations and theoretical estimates, Geophys. Res. Lett., 37, L06105, doi:10.1029/2009GL042099, 2010.

3.1.7. Рассмотрение воздействия резких изменений динамического давления и направления ММП на возбуждение магнитосферных суббурь (ИКИ)

На примере анализа возникновения и развития двух суббурь, следовавших одна за другой в событии 1 августа 1998г., обсуждается проблема триггера, приводящего к началу активизации авроральных процессов (суббурь).

Первая спонтанная суббуря была вызвана накоплением избыточной энергии в магнитном хвосте и инжекцией энергичных электронов из плазменного слоя. Во втором событие авроральное возмущение оказалось сильно модулированным вариациями давления солнечного ветра Анализ развития геофизических явлений от воздействия вариаций давления солнечного ветра позволяет предположить, что в данном событии сильный импульс давления солнечного ветра послужил триггером для развития данной суббури

На основании анализа развития двух суббурь, начало которых было вызвано разными причинами – внешним триггером для второго случая и, по-видимому, внутренним для первого, показано, что наблюдаемые суббуревые явления схожи между собой.

Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Дмитриев А.В., Климов П.М., Рахматулин Р.А., О роли скачков давления солнечного ветра в процессах инициации и управления магнитосферной суббурей, Солнечно-земная физика (в печати), 2010.

Natalia Borodkova, Vladimir Parkhomov and Georgy Zastenker. Comparison of Two Successive Substorms Observed on August 1, 1998. Report at European Geosciences Union General Assembly, May 2 - 8, 2010, Vienna Austria. N. Borodkova, V. Parkhomov and G. Zastenker. Comparison of Two Substorms Observed on August 1, 1998. Доклад на 38-ой научной ассамблее КОСПАР, Бремен, Германия, 17 – 24 июля 2010г.

3.1.8. Механизм связи глобальных и локальных магнитосферных масштабов (ИКИ)

Найдены сверхбыстрые плазменные струи (СПС, магнитозвуковое число Маха $1 < M_{MS} \le 3$, кинетическое давление до 5 раз выше, чем в солнечном ветре (СВ), толщина до 10^4 км), наиболее вероятно – собственные моды системы СВ - магнитосфера, переносящие возмущения подобно фононам при установлении равновесия. СПС связывают глобальные и локальные масштабы, т.е. приводят к перемежаемости и мультифрактальности системы, что важно и для лабораторной, и для астрофизической плазмы (jets).

Рис.1 Деформация МП (МР, синяя линия, ТЕМИС 30.10. 2007 г.) под действием АП (НFA) и СПС (Jet). СПС с $M_{MS} \sim 1.7$ видна лишь на ТЕМИС –А. SW-CB, MSH-MГC, BS-УВ, магнитное давление $W_b < 1/3$ [кэВ/см³]. Ранее выступ МП (синий пунктир) может выходить за номинальную УВ.



Объяснен механизм аномальной динамики магнитослоя (МГС), который может пересекаться спутниками за времена до 2 порядков меньшие нормальных, а магнитопауза (МП) – прогибаться на расстояния порядка толщины МГС и выходить за стационарную ударную волну (УВ). Деформацию вызывают именно СПС.

Amata, E., Savin, S., Ambrosino, D. et al., High kinetic energy density jets in the Earth's magnetosheath: A case study. Planet. Space Sci. (2010), doi:10.1016/j.pss.2010.07.021

Savin, S., Amata, E., Sibeck, D. et al., Magnetosheath crossings in few minutes: anomalous dynamics with supermagnetosonic highly- deflected and stratified flows, D31-0026-10, 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, (2010)

3.1.9. Анализ баланса давлений на магнитопаузе по данным международного проекта **THEMIS** (ИКИ)

Продолжен анализ соблюдения баланса давлений на магнитопаузе. Использованы данные наблюдений международного проекта THEMIS. Определялось динамическое, статическое давления плазмы и магнитное давление в магнитослое, магнитное давление и статическое давление плазмы внутри магнитосферы. Изучены вариации полного давления при нахождении одного из спутников внутри магнитосферы, а другого в магнитослое вблизи магнитопаузы. Выделено событие, при котором направление магнитного поля вблизи магнитопаузы имело южную ориентацию при северной ориентации магнитного поля в солнечном ветре. Проведено сравнение уровня флуктуаций магнитного поля с величиной магнитного поля внутри магнитосферы для выделенных событий. Показано, что, несмотря на значительные флуктуации магнитного поля и параметров плазмы магнитослоя, баланс давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки может соблюдаться с точностью ~10% сравнимой с точностью определения гидродинамических параметров.

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. ??, 2011. (в печати)

3.1.10. Анализ и интерпретация данных о пучках почти моноэнергетических ионов (ПМИ) в спектрах энергичных частиц (E=30-800 кэВ) около границ магнитосферы Земли, открытых в эксперименте ДОК-2 проекта «Интербол» (ИКИ)



По ~800 событий проведен статистический детальный анализ основных характеристик ПМИ. По данным пучков детектора, направленного 0T Солнца, уточнена средняя длительность событий ПМИ -105 с. В рамках предложенной модели генерации пучков ПМИ получено объяснение тому, что среднее значение отношения площадей линий протонов и альфа-частиц в спектрах ПМИ (S1/S2) в ~3 раза меньше, чем среднее отношение плотностей ионов, этих измеренных

солнечном ветре Np/Na=37.26. Предложенный нами механизм ускорения всегда дает преимущество альфа-частицам перед протонами при образовании моноэнергетических линий.

В рамках нашей модели генерации ПМИ дано объяснение характеру изменений энергии и интенсивности протонной линии в первые 30 с после начала процесса ускорения. Дальнейшее изучение этого явления может дать информацию о крупномасштабных свойствах и динамике токового слоя околоземной ударной волны (ОЗУВ).

Уточнены механизм и модель ускорения ПМИ, согласно которым ПМИ являются результатом ускорения ионов солнечного ветра в потенциальном электрическом поле, образующемся при разрыве волокон токового слоя ОЗУВ. Установлено, что в большинстве случаев в качестве причины разрыва токовых волокон выступает явление Hot Flow Anomaly, возникающее при взаимодействии тангенциального разрыва (TP) в солнечном ветре с ОЗУВ. Для подтверждения этого проведен анализ нескольких событий, в которых на Интербол-1 почти одновременно наблюдались все три явления (TP, HFA и ПМИ). На рисунке приведен пример результатов анализа для одного из таких событий.

Луценко В.Н., Гаврилова Е.А., Одновременные наблюдения на ИСЗ Интербол-1 прихода токового слоя в солнечном ветре к околоземной ударной волне, образования аномалии горячего течения и генерации пучка почти моноэнергетических ионов, доклад на конференции ИКИ "Физика плазмы в солнечной системе", 8-12 февраля 2010.

3.1.11. Определение расстояния до подсолнечной точки магнитосферы (ИЗМИРАН)

Проведено сопоставление двух способов расчета расстояния до подсолнечной точки магнитосферы (Япт): а) на основе баланса давлений плазмы солнечного ветра и магнитного поля Земли; б), на основе современных аналитических моделей этого расстояния, созданных по статистическим данным о положении дневной магнитопаузы в зависимости от параметров межпланетной среды, полученных в результате спутниковых измерений. Это сопоставление показало, что для спокойных и средне возмущенных состояний магнитосферы точность аналитических моделей аналогична точности расчетов на основе баланса давлений. Но в периоды сильных геомагнитных возмущений, когда Rпт достигает величины 7 - 5 радиусов Земли, использование аналитических моделей приводит к ошибке, которая составляет величину порядка 1-1,5 радиуса. Такая ошибка связана с тем, что в периоды сильных геомагнитных возмущений амплитуды параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля значительно превышают амплитулы этих величин, которые были использованы при создании аналитических моделей. Более точное согласие расчета Rпт с экспериментальными данными на основе баланса давлений, рассчитываемого на основе современных моделей магнитного поля (модель Цыганенко, Параболоидная модель НИИЯФ МГУ) в околоземном пространстве, позволяет построить справочную таблицу значений расстояния до подсолнечной точки в зависимости от параметров межпланетной среды. Построение такой таблицы Rпт, как функции Bz компоненты вектора межпланетного магнитного поля и давления плазмы солнечного ветра, начата нами и будет закончена в следующем году.

3.1.12. Расчет токовых систем магнитосферы для бури 2 сентября 1859 г. (ИЗМИРАН)

Большие (гигантские) магнитные бури генерируются необычно высокими амплитудами параметров межпланетной среды, при взаимодействии солнечного ветра с земной магнитосферой. Одной из таких бурь является историческая магнитная буря 2 сентября 1859 года, зарегистрированная на обсерватории Колаба (Индия), генерация которой, как полагают зарубежные исследователи, была вызвана подошедшим к Земле солнечным плазменным выбросом, в котором скорость солнечного ветра была порядка 1500-1700 км/с; концентрация плазмы в нем - порядка 1200-1600 см⁻³, а амплитуда вертикальной южной компоненты вектора межпланетного магнитного поля - порядка - (40-60)нТл. Индекс Dst для этой бури, как полагают, был порядка 1000-1500 нТл. Зарегистрированное геомагнитное возмущение характеризуется очень быстрым и очень высокоамплитудным

изменением Н компоненты геомагнитного поля в главную фазу магнитной бури и таким же быстрым его восстановлением. Обычный генератор такого возмущения, которым считается магнитосферный кольцевой ток, не может создавать такие быстрые высокоамплитудные вариации и не может так быстро распадаться. Для объяснения физической природы такого резкого по времени изменения геомагнитного поля, что должно приводить к развитию мощных теллурических токов, способных вызывать сбои в работе наземных линий электропередач, трубопроводов и кабельных сетей, был проведен расчет магнитного возмущения с такими входными параметрами модельный межпланетной среды, как указаны выше, на широте обсерватории Колаба. Расчет опирался на модель ИЗМИРАН, разработанной для расчета высокоширотных токовых систем и токовой системы хвоста магнитосферы во время магнитных бурь. При этом учитывался эффект смещения овала полярных сияний, где возникают наиболее сильные токи в период магнитных бурь, в сторону экватора, вплоть до широт порядка 40⁰, что подтверждается данными о полярных сияниях в период этой гигантской магнитной бури. Модельный расчет показал, что именно смещение высокоширотных токовых систем к югу в период больших магнитных бурь и, сопровождающее это смещение, приближение к Земле токовой системы хвоста магнитосферы, могут генерировать такие резкие Dst вариации, которые характеризуют гигантскую магнитную бурю.

Список публикаций для 3.1.11-3.1.12

Levitin A.E., L.I. Gromova, L.A. Dremukhina, E.G. Avdeeva, A.U. Burtsev, Calculation of the magnetopause standoff distance, 33rd Annual Seminar 'PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA', Apatity, 2 -5 March, Abstracts PGI-10-01-126, p.29, 2010.

Dremukhina L.A., A.E. Levitin, L.I. Gromova N.G. Ptitsina, Modeling of the geomagnetic field duirng the extreme geomagnetic storm 2 September 1859. Conference "Problems of Geocosmos", St. Petersburg, Petrodvorets, 20-24 September, 2010, Book of Abstracts, p. 35, 20010.

3.1.13. Исследование флуктуаций скорости плазмы в хвосте магнитосферы на базе данных измерений в проекте THEMIS (ИКИ и НИИЯФ МГУ)

Проведен анализ зависимости диагональных компонент тензора вихревой диффузии на различных геоцентрических расстояниях в плазменном слое магнитосферы Земли в магнитоспокойное время и во время магнитосферной суббури.



Рис. 1. Радиальные зависимости диагональных элементов тензора вихревой диффузии, полученные в ходе анализа наблюдений в международном проекте THEMIS. Темные кружки – магнитоспокойное время, светлые квадраты – взрывная фаза суббури, темные ромбы – фаза восстановления.

Использована база данных 5 спутников международного проекта TEMIS. Проведен анализ флуктуаций скорости плазмы, определяемых по результатам измерений приборов ESA и SST. Определялись амплитуды флуктуаций и автокорреляционное время. В отличие от опубликованных в 2009 г. результатов, полученных на базе спутника Интербол/Хвостовой зонд, получены значения коэффициентов диффузии не только в Z (D_{zz}) и Y (D_{yy}), но и в X направлении D_{xx} . Исследована зависимость данных коэффициентов от фазы суббури и геоцентрического расстояния. Подтверждены результаты, полученные на базе спутника

Интербол/Хвостовой зонд, демонстрирующие рост коэффициентов диффузии с ростом геоцентрического расстояния. Полученные результаты позволяют объяснить локализацию начала взрывной фазы магнитосферной суббури на сравнительно небольших геоцентрических расстояниях <10R_E, где невелик уровень турбулентных флуктуаций и движение плазмы перед началом взрывной фазы суббури близко к ламинарному.

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., in press (accepted), 2010.

3.1.14. Исследования магнитной турбулентности в области внешнего магнитосферного каспа Земли (ИКИ)

Продолжены исследования магнитной турбулентности в области внешнего магнитосферного каспа Земли, основанные на анализе многоточечных измерений



Кластера. Подтверждены представленные ранее И сформулированы новые важные положения, относящиеся к свойствам турбулентных образований в бесстолкновительной имеющие, плазме, повидимому, универсальный характер.

1. Турбулентность В области внешнего каспа почти целиком характеризуется когерентными колебаниями магнитного поля, ПО крайней мере, на расстояниях между точками измерения до ~

650 км. Она состоит большей частью из волн, близких по свойствам к известным МГД собственным модам.

2. Дисперсионная картина магнитных флуктуаций в области длин волн от ларморовского радиуса протонов до нескольких ларморовских радиусов однозарядного иона кислорода в каждый момент времени представляет собой смесь волновых пар, имеющих равные по величине и противоположно направленные волновые векторы.

3. Волновые пары, регистрируемые в последовательные интервалы времени с помощью анализа, выделяющего максимальные по амплитуде сигналы, показывают вращение волновых векторов в трех плоскостях.

На рисунке представлен пример наложенных парных волновых векторов 150 двойных дисперсионных линий, в проекциях на три GSE координатные плоскости. Они получены для скользящих временных интервалов наблюдения длительностью 90 с, отбираемых в течение 10 мин с шагом 4 с. Число точек по волновым числам для каждой пары дисперсионных кривых -256. Можно видеть, что каждому k- вектору соответствует такой же вектор с обратным знаком. Совокупность всех волновых векторов заполняет в пространстве полный телесный угол.

С.А. Романов, Э. Амата, М. Данлоп, С.П. Савин, Турбулентность плазмы в области магнитосферного каспа как она представляется на основе обработки измерений четырех аппаратов Кластера, Доклад на конференции «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ, 8 -12 февраля 2010 г.

3.1.15. Космическая погода: история исследования и прогнозирование (ИКИ НАНУ-НКАУ и ИКИ)

Приводится исторический обзор результатов по солнечно-земной физике и методов прогнозирования геомагнитных бурь. Одним из неучтенных факторов в современных прогнозах является различия механизмов генерации магнитных бурь разными возмущенными типами солнечного ветра. Отмечается, что ввод в прогностические схемы информации о типе солнечного ветра может повысить надежность и точность прогноза.

А. С. Парновский, Ю. И. Ермолаев, И. Т. Жук, Космическая погода: история исследования и прогнозирование, *Космічна наука і технологія.* 2010. Т. 16. № 1. С. 90–99.

3.1.16. Влияние скачков давления солнечного ветра на развитие ионноциклотронной неустойчивости в магнитосфере (ПГИ)

На основе наблюдений геомагнитных пульсаций в обс. Ловозеро, протонных сияний (излучения возбужденных атомов водорода, образовавшихся в результате захвата электронов протонами, высыпающимися из магнитосферы в атмосферу Земли) со спутника IMAGE, а также измерений параметров солнечного ветра в период 2001-2005 гг. исследована взаимосвязь скачков давления солнечного ветра, вспышек «протонного» свечения в дневной субавроральной ионосфере и всплесков геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc1. Показано, что вероятность вспышек протонных сияний во время скачков динамического давления солнечного ветра, связанных с межпланетными ударными волнами вдвое больше, чем во время взаимодействия магнитосферы с тангенциальными разрывами. Найдена почти 100% корреляция вспышек «протонного» свечения и всплесков Рс1 в Ловозеро в периоды магнитного сопряжения протонных сияний и наземной станции. Сделан вывод, что вспышки протонного свечения и геомагнитные пульсации – это результат ионно-циклотронной неустойчивости, развивающейся В дневной экваториальной магнитосфере при сжатии магнитосферы во время скачка динамического давления солнечного ветра. Скачки давления солнечного ветра, связанные с межпланетными ударными волнами, чаще приводят к превышению порога неустойчивости по сравнению с тангенциальными разрывами за счет большего сжатия магнитосферы (как это следует из рассмотрения вариаций геомагнитного индекса SYM-H; см. Таблицу 1).

	МУВ	ТР	Всего	Среднее
				∆(SYM-H), нТл
Число отобранных событий	40	22	62	25.7
Число скачков давления, вызвавших	34	10	44	30.7
вспышку протонных сияний				
Число случаев, когда обс. Ловозеро	19	6	25	30.8
была сопряжена со вспышкой (и	(19)	(5)	(24)	
наблюдались Рс1)				
Число случаев, когда обс. Ловозеро НЕ	15	4	19	30.6
была сопряжена со вспышкой (и	(5)	(1)	(6)	
наблюдались Рс1)				
Число случаев без вспышек протонных	6	12	18	11.8
сияний (и наблюдались Pc1)	(2)	(0)	(2)	
Среднее ∆(SYM-H), нТл	31.1	14.9	25.7	

Таблица 1.

МУВ – события связанные с межпланетными ударными волнами.

ТР – события связанные, предположительно, с тангенциальными разрывами.

Попова Т.А., А.Г. Яхнин, Т.А. Яхнина, Х. Фрей. Взаимосвязь между скачками динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1, Геомагнетизм и аэрономия, Т. 50, №5, 595-602, 2010. (0.84 а.л.).

3.1.17. Конфигурация магнитного поля в ближней магнитосфере во время различных потоков солнечного ветра (ПГИ)

Рассмотрены различия в широте границы изотропии энергичных протонов, которая характеризует вытянутость силовых линий хвоста магнитосферы, в различные фазы солнечного цикла и в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с различными типами потоков солнечного ветра (рекуррентными высокоскоростными потоками солнечного ветра, «магнитными облаками», сжатым солнечным ветром на фронтах быстрых потоков). Сделан вывод о том, что силовые линии магнитного поля в ночной магнитосфере наиболее вытянуты в хвост в периоды «магнитных облаков» с направленным к югу межпланетным магнитным полем.

Известно, что чем меньше широта экваториальной границы изотропных потоков энергичных частиц, измеряемых на низкоорбитальных спутниках, тем более вытянутыми являются силовые линии в ночной приземной магнитосфере. Большая вытянутость силовых линий означает большую интенсивность токов в хвосте магнитосферы и приближение токового слоя к Земле (Sergeev et al., 1993). На основе наблюдений потоков частиц на спутниках DMSP нами рассмотрены вариации границы изотропии, характеризуемой широтой максимума высыпаний протонов (b2i) (Newell et al., 1998). Наблюдения охватывают период с 1984 г. по 2009 г., включающий три минимума и два максимума солнечной активности. Показано, что в годы максимума солнечной активности широта изотропной границы в ночном секторе ниже, чем в годы минимума. Наибольшая широта изотропной границы наблюдалась в период аномально затянувшегося минимума солнечной активности (2007-2009 гг.). Рассмотрение корреляций между параметрами солнечного ветра, индексами геомагнитной активности и широтой границы изотропии позволило сделать выводы о том, что 1) из параметров солнечного ветра наибольшее влияние на конфигурацию магнитного поля магнитосферы оказывает «электрическое поле пересоединения» и 2) геомагнитная активность в большей степени зависит от конфигурации силовых линий в приземной магнитосфере, чем от параметров солнечного ветра.

Рассмотрены различия в конфигурации магнитосферы во время взаимодействия магнитосферы Земли с потоками солнечного ветра разных типов. Показано, что в периоды «магнитных облаков» с направленным к югу межпланетным магнитным полем силовые линии ночной магнитосферы более вытянуты по сравнению с другими типами потоков солнечного ветра (рис.). Полученные результаты согласуются с измерениями магнитного поля в магнитосфере во время геомагнитных бурь, связанных с магнитными облаками, и позволяют понять причины, по которым суббури во время таких бурь происходят на относительно низких широтах и развиваются в более широком долготном секторе.

Newell, P. T., V. A. Sergeev, G. R. Bikkuzina, and S. Wing, Characterizing the state of the magnetosphere: Testing the ion precipitation maxima latitude (b2i) and the ion isotropy boundary, *J. Geophys. Res.*, *103*(A3), 4739, 1998. Sergeev, V. A., M. V. Malkov, and K. Mursula, Testing of the isotropic boundary algorithm method to evaluate the

magnetic field configuration in the tail, J. Geophys. Res., 98, 7609, 1993.



Рис. 1. Зависимость широты изотропной границы от MLT в различных условиях. Слева - в период минимума солнечной активности; справа – в период максимума солнечной активности.

1 - средняя вариация за выбранный период;

2 - во время рекуррентных потоков солнечного ветра;

3 - во время интервалов с повышенной плотностью плазмы солнечного ветра, предшествующих рекуррентным потокам (CIR).

4 - во время интервалов с повышенной плотностью плазмы солнечного ветра, предшествующих «магнитным облакам» (Sheath);

5 - во время магнитных облаков с южной ориентацией Вz-компоненты магнитного поля.

Яхнина Т.А., Яхнин А.Г. Magnetotail stretching under different solar wind conditions, Proceedings of 33rd Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena", 2010, in press

3.2. Динамика токовых слоев в хвосте и на границах магнитосферы

3.2.1. Общая структура и эволюция токового слоя, вложенного в плазменный слой хвоста магнитосферы Земли (ИКИ)

Проведено исследование тонких токовых слоев, вложенных в существенно более толстый изотропный токовый слой – характерной структуры в хвосте магнитосферы Земли. Введены количественные параметры, описывающие такую вложенную многомасштабную систему. Для исследований использовалась статистика спутников Cluster, эмпирическая модель и самосогласованная модель. Как экспериментальные, так и теоретические данные показывают, что толщина вложенного токового слоя составляет порядка ионного ларморовского радиуса. Вложенный токовый слой может быть описан двумя основными отношениями 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 F₀ и F_{ext}, величины соответствующих магнитных потоков, причем последнюю пару можно считать примерно постоянной. Во время фазы накопления суббури плотность тока вложенного слоя увеличивается, и, соответственно, растет величина магнитного поля В₀, в то время как толщина вложенного слоя уменьшается. Слои с наиболее интенсивными токами (большими В₀) наблюдаются после взрывной фазы. Построена самосогласованная модель вложенного слоя, включающая в себя токи неадиабатических ионов и замагниченных электронов (вложенный слой), а также крупномасштабный фоновый ток, поддерживаемый

горячими изотропными частицами плазмы (внешний плазменный слой). Показано, что когда вложенный протонный токовый слой становится достаточно тонким (при постепенном возрастании доли неадиабатических ионов), внутри него возникает токовый слой с характерным масштабом электронного вращения благодаря усилению дрейфа кривизны электронов.

Petrukovich A.A., Artemyev A.V., Malova H.V., Nakamura R., Popov V.Yu., Zelenyi L.M., Place of embedded thin current sheet in the Earth's magnetotail, J. Geophys. Res., 2010, (in press)

3.2.2. Структура отражения быстрого потока на границе внутренней магнитосферы и сопутствующие осцилляции (ИКИ)

По данным проекта THEMIS (17 марта 2008 года 9-11 UT) продемонстрирована эволюция ближнего хвоста магнитосферы Земли во время отражения и разворота быстрого плазменного потока. Все спутники последовательно (в зависимости от своей позиции) наблюдали быстрый поток, подходящий к Земле, тормозящий и разворачивающийся в обратную сторону с образование вихрей. Разворот сопровождался соответствующей динамикой давления: градиент давления в сторону Земли достиг максимума в момент максимального приближения потока к Земле и затем постепенно снизился по мере разворота потока. В следующем событии наблюдалось и достаточно редкое повторное отражение уже направленного в хвост отраженного потока, опять в сторону Земли, которое можно понять как осцилляцию около некоторого квазиравновесного положения.

E.V. Panov, R. Nakamura, W. Baumjohann, V. Angelopoulos, A. A. Petrukovich, A. Retino, M. Volwerk, T. Takada, K.-H. Glassmeier, J. P. McFadden, and D. Larson, Multiple overshoot and rebound of a bursty bulk flow, Geophys. Res. Lett., 37, L08103, doi:10.1029/2009GL041971, 2010.

E.V. Panov, R. Nakamura, W. Baumjohann, V.A. Sergeev, A.A. Petrukovich, V. Angelopoulos, M. Volwerk, A. Retino, T. Takada, K.-H. Glassmeier, J.P. McFadden, D. Larson, Plasma Sheet Thickness During A Bursty Bulk Flow Reversal, J Geophys.Res., 115, A05213, doi:10.1029/2009JA014743, 2010.

3.2.3. Экспериментальное исследование низкочастотных колебаний магнитных силовых трубок Пограничного Плазменного Слоя (ППС) хвоста магнитосферы Земли (ИКИ)

На основе четырехспутниковых измерений Cluster магнитного и электрического поля, а также характеристик плазмы в ППС хвоста магнитосферы Земли выполнено исследование низкочастотных (с частотами много меньшими локальной ионной циклотронной частоты) колебаний магнитных силовых трубок ППС. Установлено, что данные колебания представляют собой электромагнитные волны, распространяющиеся к Земле вдоль силовых линий магнитного поля с локальной альвеновской скоростью. Характерные периоды колебаний составляют 1-4 мин и длины волн ~5 - 20 R_E. Впервые статистически доказана связь низкочастотных поперечных колебаний альвеновского типа магнитных силовых трубок ППС и потоков ускоренных ионов, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля высокоширотной границы ППС со скоростями, превышающими двойную величину локальной альвеновской скорости. Тот факт, что величина полного продольного электрического тока на высокоширотной границе ППС часто существенно меньше величины продольного тока, создаваемого ускоренными ионами, движущимися вдоль силовых линий магнитного поля, позволяет считать высокоскоростные ионы частью плазменного потока И рассматривать неустойчивость Кельвина-Гельмгольца. возникающую на границе ППС с окружающей малоподвижной плазмой, в качестве наиболее вероятного источника этих колебаний.

Статистически установлено, что во всех случаях величина потока кинетической энергии, переносимой высокоскоростными ионами, движущимися к Земле вдоль силовых линий ППС в несколько десятков раз превышала даже самые большие значения потока электромагнитной энергии, переносимой низкочастотными альвеновскими волнами. Это позволяет сделать два вывода: і) потери энергии ускоренных ионов на возбуждение низкочастотных альвеновских колебаний не должны заметно влиять на характеристики ионных функций распределения в ППС; іі) вклад низкочастотных альвеновских волн в энергетику высокоширотной авроральной области далеко не всегда является определяющим, как предполагалось ранее.

Grigorenko, E. E., Burinskaya, T. M., Shevelev, M., Sauvaud, J.-A., and Zelenyi, L. M. Large-scale fluctuations of PSBL magnetic flux tubes induced by the field-aligned motion of highly accelerated ions, Annales. Geophysicae, 28, 1273-1288, 2010.

Григоренко Е.Е., Колева Р., Зеленый Л.М. и Сово Ж.-А. Ускоренные ионы, наблюдаемые в пограничном плазменном слое: пучки или потоки?, Геомагнетизм и Аэрономия, 50, №6. 749-761, 2010.

3.2.4. Формирование резонансных областей в токовых слоях магнитосферы (ИКИ)

Проведен анализ распределения субструктур энерго-дисперсионных форм VDIS, наблюдаемых вблизи полярного края авроральной зоны с энергиями 1-30 кэВ, причем энергия в субструктурах увеличивается с увеличением инвариантной широты. Осуществлены экспериментальные проверки механизма неадиабатического ускорения и «резонансной» генерации ионных пучков (бимлетов) в тех областях токового слоя хвоста магнитосферы, из которых ионы распространяются к Земле. Для этих областей теоретически был предсказан универсальный закон, связывающий энергию ионов W(N) с номером резонансной области N=1,2,3...: lnW(N) ~1.33*lnN [1]. Экспериментальные результаты по данным независимых экспериментов ИОН (спутник ИНТЕРБОЛ-2) и CIS (спутник CLUSTER) показывают, что при линейной аппроксимации кривых связи энергии ионов с номером субструктуры VDIS (ln W(N)=A* lnN +B) наклон А изменяется в диапазоне 0.60-1.94, т.е. отличается от теоретического значения 1.33. Расхождение может быть объяснено действием электрического поля ЕД, перпендикулярного токовому слою. Согласно математическому моделированию наличие ЕZ может сдвигать области резонансов к Земле и уменьшать наклон по сравнению с А=1.33 или - от Земли и увеличивать при этом наклон [2]. Однако для объяснения экстремальных величин наклона А, полученных в экспериментах, требуется, вероятно, учет дополнительных факторов, влияющих на процессы формирования резонансных областей в токовых слоях хвоста магнитосферы.

[1] Л.М.Зеленый, М.С.Долгоносов, Е.Е. Григоренко, Ж.-А. Сово, Письма в ЖЭТФ, 85, 4, 225-231, 2007 [2]M.S. Dolgonosov, G.Zimbardo, and A. Greco, J. Geophys. Res, 115, A02209, doi: 10.1029/2009JA014398, 2010.

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

1) Подготовлен и принят к печати обзор, посвященный 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 слоев связано с проявлением сложных динамических процессов, развивающихся в бесстолкновительной космической плазме во время геомагнитных возмущений и вблизи областей пересоединения. В обзоре описаны модели тонких токовых структур в хвосте магнитосферы Земли, в основе которых заложены представления о квазиадиабатической

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 интегралов движения частиц: полной энергии и квазиадиабатического инварианта. Рассмотрены различные модификации исходного равновесия, включающие в себя учет токов замагниченных электронов, вклад асимметрию источников плазмы и эффекты, ионов кислорода, 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. Проведен анализ эволюции разрывной моды и найдены параметрические области, в которых возможен рост данной моды. Таким образом, на основе квазиадиабатической модели токового слоя решен 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 перетяжечная 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, 2010, в печати

2) Изучены свойства разных равновесных токовых конфигураций, включающих в себя тонкие токовые слои, где электроны являются замагниченными, а ионы размагничиваются в нейтральном слое и движутся вдоль особых петляющих орбит. Показано, что тонкие токовые слои обладают новыми свойствами по сравнению с хорошо изученными изотропными структурами. В частности, для них характерны многомасштабность и метастабильность. Тонкие токовые слои могут длительное время находиться в состоянии равновесия, а потом спонтанным образом разрушаться с высвобождением большого количества энергии в виде кинетической энергии заряженных частиц и электромагнитных волн. Исследовано влияние многомасштабности на устойчивость токовых слоев по отношению к разрывной (тиринг-) и кинк- модам. Показано, что экспериментальные наблюдения эволюции токовых слоев в хвосте земной магнитосферы согласуются с концепцией метастабильности, заложенной в работах СИ. Сыроватского и А.А. Галеева. Анализ экспериментальных данных подтверждает, что большинство наблюдаемых в хвосте земной магнитосферы тонких токовых слоев являются метастабильными: их положение в пространстве параметров определяет конечность времени устойчивости по отношению к разрывной моде. Так, в процессе развития предварительной фазы суббури, токовые слои «перемещаются» в пространстве параметров по направлению к области неустойчивости. Показано, что концепция метастабильности, объясняющая чередование длительных подготовительных фаз с быстрым высвобождением запасённой энергии, находит применение в современной теории магнитосферных суббурь. Возможность развития разрывной и сдвиговой неустойчивостей (симметричная и несимметричная моды) исследованы в широкой области параметров задачи.

Зеленый Л.М., Артемьев А.В., Малова Х.В., Петрукович А.А., Накамура Р., Метастабильность токовых слоев, Успехи Физических Наук, Т. 180, N 9, , С. 973-982, DOI:10.3367/UFNr.0180.201009f.0973, 2010.

3) Построена самосогласованная теория анизотропных токовых равновесий, поддерживаемых в плазме с немаксвелловским распределением частиц по скоростям в

случае, когда плазма состоит из холодных электронов и двух горячих ионных компонент с температурами. Ионные популяции плазмы описываются разными В рамках квазиадиабатического приближения, в то время как электроны – в МГД приближении. Получены приближенные стационарные решения системы уравнений Власова-Максвелла и проведено их параметрическое исследование. Показано, что эти решения могут описывать разнообразные профили токовых слоев: от тонких токовых структур с максимумом плотности тока в нейтральном слое до сравнительно «толстых» токовых слоев с двумя или тремя максимумами плотности тока. Также показано, что электронная компонента с анизотропным распределением доминирует в центре токового слоя и может поддерживать узкий центральный пик плотности тока. Ионная компонента доминирует на периферии токового слоя, определяя его характерную толщину. Проведено сравнение с результатами численного моделирования в двухтемпературной плазме (метод крупных частиц) и с экспериментальными данными, полученными на спутниках Cluster. Это сравнение выявило хорошее соответствие между результатами теоретического анализа, численного моделирования и экспериментальными данными; это позволяет сделать вывод о том, что разрабатываемая теория достаточно адекватно описывает бесстолкновительные токовые слои в космической плазме.

Малова Х.В., Л.М. Зелёный, О.В. Мингалев, И.В. Мингалев, В.Ю. Попов, А.В. Артемьев, А.А. Петрукович, Токовый слой в бесстолкновительной немаксвелловской плазме: самосогласованная теория, моделирование и сравнение со спутниковыми экспериментами, Физика плазмы, Т.36, N9, с. 897-915, 2010.

4) Вклад нескольких наиболее важных механизмов ускорения и нагрева частиц плазмы в магнитосфере Меркурия был исследованы в рамках различных моделей магнитосферы Меркурия. Показано, что самые эффективные механизмы ускорения в магнитосфере Меркурия – рассеяние частиц на плазменной турбулентности и рассеяние в результате многократных диполизаций во время суббуревых возмущений (которые происходят гораздо чаще, чем на Земле и имеют существенно меньшую продолжительность). Сравнение с аналогичными плазменными процессами в магнитосфере Земли показывает, что вклад этих механизмов ускорения и нагрева является более существенным для Меркурия, чем для Земли, из-за малости магнитосферы Меркурия, ее сильной изменчивости и близости к Солнцу. Оценен верхний предел энергий ускоренных частиц, который определяется соотношением между ларморовскими радиусами ускоренных частиц и размерами меркурианской магнитосферы: когда частицы достигает предельных энергий (для Меркурия – порядка сотни кэВ), они не могут захватываться магнитосферой планеты и покидают ее.

Lev M. Zelenyi, Alexey G. Korgov, Helmi V. Malova, Victor Yu. Popov, Anton V. Artemyev and Dominique C. Delcourt, Charged particle acceleration in the Hermean magnetosphere: the role of dipolarizations, plasma turbulence and induction electric fields, in the book: ADVANCES IN GEOSCIENCES (A 6-Volume Set) - Volume 19: Planetary Science (PS) © World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., http://www.worldscibooks.com/etextbook/7158/7158 v19 toc.pdf, p.p. 9-28, 2010

3.2.5. Моделирование тонких токовых слоев (ПГИ)

При помощи численной модели, основанной на методе крупных частиц, для равновесных симметричных конфигураций тонкого токового слоя (TTC) в хвосте магнитосферы исследована структура функции распределения поддерживающих токовый слой пролетных ионов и построен ряд ее сечений. Полученный вид функции распределения качественно хорошо согласуются как с данными измерений на спутниках, так и с результатами развиваемой в ИКИ РАН аналитической модели TTC.

Создан вариант численной модели, основанной на методе крупных частиц, который для равновесных симметричных конфигураций тонкого токового слоя (TTC) в хвосте магнитосферы позволяет получать сечения функции распределения поддерживающих токовый слой пролетных ионов в любой точке области расчетов. Построены сечения этой функции распределения в наиболее важных точках области моделирования: вдали от токового слоя, в окрестности границы токового слоя, и в самом токовом слое. В расчетах используется около 100 миллионов модельных частиц и параллельные вычисления, что позволило получить достаточно детальное воспроизведение функции распределения ионов как в образующих слой потоках плазмы из долей хвоста магнитосферы, падающих вдоль силовых линий, так и в самом токовом слое. Показано, что в случае максвелловских источников вне ТТС функция распределения пролетных ионов близка к гиротропной, но заметно отличается от бимаксвелловской, хотя её вторые моменты очень близки ко вторым моментам бимаксвелловской функции. Внутри ТТС функция распределения ионов является существенно не гиротропной, и её вторые моменты заметно отличаются от моментов бимаксвелловской функции. При этом отход от гиротропности происходит двух зонах. В первой более широкой зоне, примыкающей к краям слоя, в размагничивается и «срывается» с силовых линий основная масса ионов с большими питч-углами, в то время как основная масса ионов с малыми питч-углами остается замагниченной. Во второй более узкой зоне в центре слоя размагничивается и «срывается» с силовых линий основная масса и этих ионов. Полученные результаты качественно хорошо согласуются как с данными измерений на спутниках, так и с результатами развиваемой в ИКИ РАН аналитической модели ТТС. Результат получен совместно с сотрудниками ИКИ РАН.

Mingalev et al., 38th COSPAR Assembly 2010, Bremen, Germany, 18-25 July 2010, Mingalev et al., 33rd Annual Seminar on Physics of auroral phenomena, Apatity, 2-5 March, 2010.

3.3. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами

3.3.1. Исследование процессов генерации длинноволновых низкочастотных колебаний магнитного поля в пограничной области плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли (ИКИ)

ходе проведенного нами детального анализа многоспутниковых измерений, В выполненных в рамках проекта CLUSTER, было обнаружено, что при прохождении высокоскоростных (2000-3000 км/с) потоков плазмы вдоль магнитного поля в пограничной области плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли одновременно наблюдается и распространение ультранизкочастотных колебаний (0.004-0.02 гц) магнитного поля. Характерные длины этих колебаний лежат в диапазоне 5-20 земных радиусов и существенно превышают поперечные по отношению к направлению распространяются, магнитного размеры потоков плазмы. Колебания поля преимущественно, ВДОЛЬ магнитного поля co скоростью порядка локальной альфвеновской скорости. Было проведено исследование устойчивости плазменного потока относительно возбуждения длинноволновых колебаний произвольного направления в плоской трехслойной геометрии с учетом сжимаемости плазмы при любом соотношении между альвеновской и звуковой скоростями плазмы. Исследование развития неустойчивости К-Г в зависимости от величины скорости звука показало, что возмущения с длинами волн порядка или больше толщины потока могут нарастать в произвольном направлении даже при нулевой температуре. Этот результат в корне отличается от обычно рассматриваемого случая двух полубесконечных плазм с одной границей, когда
существует область углов вблизи направления распространения потока, генерация волн в котором в продольном магнитном поле, вследствие развития неустойчивости К-Г, возможна только, если скорость звука превышает альфвеновскую скорость. В трехслойной плазме, длинноволновые колебания, возбуждаемые именно в этом диапазоне углов, существуют в ограниченном диапазоне волновых чисел даже без учета конечной ширины переходной области между потоком и окружающей плазмой. При этом, как показали расчеты, выполненные при параметрах близких к наблюдаемым, колебания с длиной волны большей ширины потока, нарастают с максимальным инкрементом при их распространении вдоль магнитного поля. При ширине потока порядка 3000 км длины волн этих колебаний больше 5 земных радиусов, что соответствует наблюдаемым длинам волн. Численные расчеты показали, что в низкотемпературной плазме решения дисперсионного уравнения, приводящие к смещениям граничных поверхностей потока типа змейки, имеют значительно более высокие инкременты, чем решения, приводящие к квази-симметричным, типа перетяжек, деформациям границ потока. Согласно экспериментальным данным, колебания в пограничной области плазменного слоя распространяются как раз в виде кинк-моды. Проведенное исследование структуры собственных мод показало, что при низких температурах моды имеют осцилляторно затухающий характер. Таким образом, результаты исследования развития неустойчивости К-Г в трехслойной модели, несмотря на ее простоту, позволяют объяснить, практически, все характерные черты рассматриваемых событий.

Т.М. Буринская, М.М. Шевелев, Ж.-Л. Рош, Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца для ограниченного потока плазмы в продольном магнитном поле ,Физика плазмы, 2010, Т. 35, №11. E.E. Grigorenko, T.M. Burinskaya, M. Shevelev, J.-A. Sauvaud, L.M. Zelenyi, Large-scale fluctuations of PSBL magnetic flux tubes induced by the field-aligned motion of highly accelerated ions, Ann. Geophys., 2010, V. 28, P.1273-1288, doi:10.5194/angeo-28-1273-2010.

3.3.2. Разработка методов расчета самосогласованных электромагнитных полей и параметров бесстолкновительной плазмы при локальных и волновых возмущениях в магнитосфере (ИКИ)

Построены точные решения уравнений Максвелла-Власова, описывающие стационарную поперечную волну с захваченными заряженными частицами. В отсутствие фоновой плазмы фазовая скорость такой волны всегда меньше скорости света. Физическая структура волны выглядит наиболее просто в системе отсчета, движущейся вместе с волной. В этой системе построенные решения соответствуют одной из простейших равновесных плазменных конфигураций типа токовых бессиловых слоев И магнитостатического поля с однородным широм. При наличии фоновой плазмы установлено простое условие существования подобных волн с показателем преломления больше единицы. Физический смысл данного условия состоит в том, что токи, обусловленные захваченными (или, в более общем случае, резонансными) частицами, несмотря на их малую концентрацию, должны превышать противоположно направленные линейные токи в плазме. Установлено дисперсионное соотношение таких «странных» чисто поперечных волн с досветовыми скоростями, учитывающее вклад захваченных частиц наряду с линейным откликом фоновой плазмы. По сути, это уравнение служит электромагнитным аналогом нелинейного закона дисперсии, установленного Бомом и Гроссом для продольных волн пространственного заряда. Однако, если в отсутствие захваченных частиц продольные плазменные колебания лишь трансформируются в обычную ленгмюровскую волну, "досветовые" волны вообще не существуют без них. фактически в работе показано, что частицы, захваченные в Таким образом. самосогласованное электромагнитное поле, могут играть роль своеобразной замедляющей структуры в свободной (неограниченной) плазме, подобно искусственным замедляющим структурам, часто применяемым в плазменной электронике. Другой вывод работы состоит в том, что утверждение о невозможности черенковского резонанса заряженных частиц с

поперечными волнами в плазме без внешнего магнитного поля, является продуктом теории возмущений (линейной теории волн в однокомпонентной плазме), и с выходом за рамки линейного приближения, вообще говоря, теряет силу, в дополнение к другим известным проявлениям нелинейности, обусловленной эффектами захвата частиц плазменными волнами.

Проведена необходимая предварительная работа расчетного характера для решения широкого класса задач о структуре трехмерных локализованных электростатических возмущений в бесстолкновительной плазме. В частности, получены достаточно общие формулы для расчетов основных моментов функций распределения заряженных частиц в сферически симметричных электростатических полях. В случае слабой нелинейности поля с помощью численных методов определен эффективный потенциал радиального движения частицы в зависимости от ее момента количества движения.

V. L. Krasovsky. Trapped particle effect on the velocity of circularly polarized electromagnetic waves in an isotropic plasma. Physics Letters A, v.374, p.1751, 2010.

3.3.3. Исследование динамики релятивистской заряженной частицы в однородном магнитном поле и поле плоской электромагнитной волны (ИКИ)

Проведено исследование динамики релятивистской заряженной частицы в однородном магнитном поле и поле плоской медленной электромагнитной волны. В задаче возможен резонанс типа "волна-частица" между скоростью ларморовского движения частицы в однородном магнитном поле и фазовой скоростью волны. Исследованы резонансные явления, возникающие при прохождении через этот резонанс. Показано, что захват в резонанс приводит к неограниченному ускорению частицы серфотронного типа. Захваченная частица движется вдоль фронта волны, причем ее энергия неограниченно (в рамках рассмотренной модели) растет. Рассеяние на резонансе приводит к стохастизации движения частицы и диффузионному росту ее энергии. Получены асимптотические формулы для вероятности захвата и амплитуды рассеяния на резонансе

A. I. Neishtadt, A. A. Vasiliev, A. V. Artemyev, Surfatron acceleration of a relativistic particle by electromagnetic plane wave, <u>http://arxiv.org/abs/1011.2236</u>

3.3.4. Динамика заряженных частиц в поле низкочастотных волн (ИКИ)

Рассмотрена задача о движении нерелятивистской заряженной частицы в поле низкочастотной электромагнитной или электростатической волны, распространяющейся в плазме перпендикулярно стационарному магнитному полю. Исследованы захват частицы волной и ее дальнейшее серфотронное ускорение. Показано, что в случае электромагнитной волны возможно неограниченное ускорение частицы. В случае электростатической волны энергия частицы может расти только до определенного уровня.

A.Neishtadt, A.Artemyev, L.Zelenyi. Regular and chaotic charged particle dynamics in low frequency waves and role of separatrix crossings. Regular and Chaotic Dynamics, v.15, pp. 564-574, 2010.

3.3.5. Захват в резонанс и серфотронное ускорение частиц высокочастотными электромагнитными волнами (ИКИ)

Проведено исследование динамики нерелятивистской заряженной частицы в поле нескольких высокочастотных электромагнитных волн, распространяющихся в плазме перпендикулярно стационарному магнитному полю. Захват частицы одной из волн приводит к серфотронному ускорению частицы. Показано, что влияние других волн может ограничивать величину достигаемой энергии, и получены оценки этой энергии.

A.Artemyev, A.Neishtadt, L.Zelenyi, D.Vainchtein, Adiabatic description of capture into resonance and surfatron acceleration of charged particles by electromagnetic waves. Принято в журнал "Chaos", планируется к опубликованию в декабре 2010.

3.3.6. Численное моделирование процессов ускорения зарядов в космической плазме волновыми пакетами с плавной огибающей амплитуды (ИКИ)

Выполнены численные расчеты процессов захвата И последующего ультрарелятивистского ускорения заряженных частиц пакетами электромагнитных волн конечной амплитуды с плавной огибающей 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. Изучена временная динамика колебаний ускоряемого заряда в эффективном потенциале волнового пакета в зависимости от его пространственного размера, начальных данных заряда, фазовой скорости пакета электромагнитных волн на несущей частоте и других параметров, а также возникновение циклотронного вращения после вылета заряда из эффективной потенциальной ямы.

Подтверждено, что при захвате частиц в режим серфинга поперечные к внешнему магнитному полю компоненты импульса захваченной частицы меняются практически линейно с ростом времени (для них получены аналитические асимптотики), а поперечные (относительно внешнего магнитного поля) компоненты скорости ультрарелятивистского заряда являются практически постоянными. Сформулированы оптимальные условия для реализации ультра-релятивистского серфотронного ускорения заряженных частиц в космической плазме пакетами электромагнитных волн с плавной огибающей их амплитуды.Проведенное исследование представляет интерес интерпретации ДЛЯ экспериментальных данных по регистрации потоков релятивистских частип в космических условиях включая околоземное пространство. В частности, как указывалось ранее, одним из возможных механизмов генерации космических лучей является серфинг заряженных частиц на электромагнитных волнах. Этот механизм может работать как в экстремальных условиях (взрывы сверхновых), так и в более спокойной обстановке, например, в солнечной гелиосфере.

Н.С.Ерохин, Н.Н.Зольникова, Е.А.Кузнецов, Л.А.Михайловская, Динамика релятивистского ускорения заряженных частиц в космической плазме при серфинге на пакете электромагнитных волн. Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника, № 4 (68), с.116-120, 2010.

3.3.7. Резонансное туннелирование электромагнитных волн через неоднородную плазму с мелкомасштабными структурами большой амплитуды (ИКИ)

Рассмотрено безотражательное прохождение электромагнитной волны с круговой поляризацией через слой неоднородной киральной плазмы в отсутствие внешнего магнитного поля. Показано, что в задаче имеются свободные параметры, изменением которых можно существенно варьировать профиль неоднородности плазмы в слое с включением любого числа различных субволновых структур, областей непрозрачности. Проведен анализ точных решений линейного уравнения Гельмгольца, описывающие безотражательное прохождение электромагнитной волны через неоднородный слой плазмы с субволновыми структурами ее плотности большой амплитуды. Показано, что плазменный слой может включать достаточно широкие области непрозрачности, а также субслои, в которых имеются всплески волнового поля большой амплитуды.

Безотражательное туннелирование волн через плазму важно для понимания механизмов выхода излучения от источников, находящихся в плотной плазме в астрофизике, оно повышения эффективности представляет интерес для 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 перелача 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.

Меркулов Е.С., Ерохин Н.С., Резонансное туннелирование электромагнитной волны через слой неоднородной плазмы с генерацией всплесков волнового поля. XLVI Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии, 19-23 апреля 2010 г., Москва, РУДН, Тезисы докладов, 2010, с.25-26.

Поверенный М.В., Ерохин Н.С. Резонансное туннелирование электромагнитной волны через слой неоднородной киральной плазмы. XLVI Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии, 19-23 апреля 2010 г., Москва, РУДН, Тезисы докладов, 2010, с.27-28.

3.3.8. Исследование эффективности резонансного ускорения энергичных электронов при взаимодействии с пакетами свистовых волн с переменной частотой и амплитудой (ИПФ).

С помощью модельных расчетов исследовано влияние быстрой амплитудной модуляции квазимонохроматического волнового пакета с меняющейся частотой, что типично для хоровых излучений в магнитосфере Земли, на динамику релятивистских электронов в поле волнового пакета. Характерная частота такой модуляции порядка частоты осцилляций захваченных частиц в поле волны. Проанализировано уменьшение максимального набора энергии на одну частицу и количества ускоряемых частиц с увеличением глубины осцилляций амплитуды поля в волновом пакете. При 50процентной глубине модуляции как максимальная энергия, набираемая частицами за один проход волнового пакета, так и число частиц, ускоряемых в режиме захвата уменьшается примерно вдвое. При дальнейшем увеличении глубины модуляции максимальная энергия остается на том же уровне и достигает в условиях внешнего радиационного пояса (L = 4, 5, 5) $N_{\rm e} = 10 \text{ см}^{-3}$) 10-20 кэВ при изменении частоты волны на 15%, но число захваченных (и ускоряемых) частиц быстро уменьшается - почти на два порядка при глубине модуляции 100%. Таким образом, в случае глубокой амплитудной модуляции волнового пакета роль захваченных частиц в полном энергообмене между волной и частицами может стать порядка и меньше вклада частиц, ускоряемых в стохастическом режиме.

Демехов А.Г., Викторов М.Е. Ускорение электронов в магнитосфере Земли волновыми пакетами свистовых волн с переменной частотой // Геомагнетизм и аэрономия, 2010 (направлено в печать).

Demekhov A. G., Victorov M. E. Efficiency of electron cyclotron acceleration by whistler-mode wave packets with varying frequency and amplitude // Тез. докл. XXXIII Апатитского семинара «Физика авроральных явлений». — ПГИ КФ РАН, 2010. — С. 36.

3.3.9. Исследование закономерностей формирования спектра хоровых ОНЧ излучений в магнитосфере Земли (ИПФ).

Исследован ряд закономерностей формирования спектра хоровых ОНЧ излучений в магнитосфере Земли.

1) В частности, проведенные численные расчеты позволили подтвердить высказанное ранее предположение о роли сателлитной неустойчивости как механизме формирования дрейфа частоты в хоровых элементах. Это имеет большое значение для обоснования и уточнения полученных ранее оценок скорости дрейфа частоты как функции параметров плазмы и амплитуды волн.

2) С помощью численных расчетов изучена зависимость параметров хорового элемента от положения детектора в области генерации. В расчетах получено, что наряду с «обычными» хоровыми элементами, которые формируются при усилении волны, распространяющейся от геомагнитного экватора, можно наблюдать элементы, формируемые за счет так называемого антенного эффекта, т.е. излучения электронов, предварительно сгруппированных по фазе на более ранних стадиях их движения (в поле волны «обычных» элементов). «Антенные» хоровые элементы переходят в «обычные» по мере распространения волны. Их основная особенность с точки зрения возможных наблюдений состоит в том, что скорость дрейфа частоты в них достаточно высокая при относительно малой амплитуде волны, поскольку этот дрейф частоты определяется амплитудой «обычных» элементов, в которых происходит предварительная фазовая группировка энергичных электронов. Таким образом, в наблюдениях можно ожидать присутствия как хоровых элементов с пропорциональной связью амплитуды и скорости дрейфа частоты, так и волновых пакетов со сравнительно небольшой амплитудой, но высокой скоростью дрейфа частоты.

3) Проанализировано формирование хоровых элементов с понижающейся частотой. Исследована и сопоставлена с моделью магнитосферной лампы обратной волны наблюдаемая в эксперименте зависимость скорости дрейфа частоты от плотности фоновой плазмы, получено хорошее согласие теории и наблюдений (совместно с ПГИ РАН и зарубежными коллегами).

- Беспалов А. А., Демехов А. Г. О линейной теории режима лампы обратной волны в магнитосферном циклотронном КНЧ–ОНЧ мазере // Изв. вузов Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 845–858.
- Демехов А. Г. О генерации ОНЧ излучений с повышающейся и понижающейся частотой в магнитосферном циклотронном мазере в режиме лампы обратной волны // Изв. вузов Радиофизика. 2010. Т. 53, № 11. в печати.
- Macusova E., Santolik O., Decreau P., Demekhov A.G., Nunn D., Gurnett D. A., Pickett J. S., Titova E. E., Kozelov B.V. Observations of the relationship between frequency sweep rates of chorus wave pack ets and plasma density // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi:10.1029/2010JA015468. (in press).
- Demekhov A.G. Spectral properties of ELF/VLF chorus in the Earth's magnetosphere: a model and numerical simulations // 38-th Scientific Assembly of COSPAR: CD of Abstracts. Bremen, Germany, 2010. D34–0012–10.

Demekhov A.G. Spectral properties of ELF/VLF chorus in the Earth's magnetosphere: a model and numerical simulations // VERSIM 2010: Program & Book of Abstracts. — Prague, Czech Republic, 2010. — P. 13.

3.3.10. Исследование формирования дактов с повышенной плотностью при нагреве ионосферы мощным ВЧ излучением (ИПФ)

Методом численного моделирования проведено исследование формирования дактов с повышенной плотностью при нагреве ионосферы мощным ВЧ излучением. Такие дакты рассматриваются в связи с задачами распространения естественных и искусственных низкочастотных сигналов в магнитосфере и их взаимодействия с частицами радиационных поясов. Использованная численная модель основана на открытом коде SAMI2 (NRL, CША), модифицированном для учета эффектов КВ нагрева. Проведено сопоставление результатов расчетов с двумя экспериментами по наблюдению дактов плотности, образующихся при нагреве.

Рис. 1: Пример рассчитанного динамического спектра первоначально непрерывного излучения на выходе из ионосферы Юпитера для различных параметров плазмы и возмущения магнитного поля на трассе распространения



В одном эксперименте, выполненном на нагревном стенде "Сура", низкоорбитальный спутник DEMETER был использован в качестве диагностического средства для измерения электронной и ионной температуры и плотности вдоль орбиты спутника, пролетавшего над нагревным стендом вблизи его магнитного зенита. Во втором эксперименте, проводившемся на нагревном стенде EISCAT в Тромсё, диагностика велась с помощью радара некогерентного рассеяния EISCAT, который измерял вертикальные профили электронной и ионной температуры на высотах 150–600 км. Модель хорошо согласуется с наблюдениями и позволяет лучше понять процессы, развивающиеся при модификации ионосферы.

Milikh G.M., Demekhov A.G., Papadopoulos K., Vartanyan A., Huba J.D., Joyce G. Model for artificial ionospheric duct formation due to HF heating // Geophys. Res. Lett. - 2010. - V. 37, No. 7. L07803, doi:10.1029/2010GL042684.

3.4. Динамика радиационных поясов Земли и Юпитера

3.4.1. Новый механизм формирования квазипериодических последовательностей импульсов декаметрового радиоизлучения Юпитера (ИПФ)

формирования Предложен квазипериодических новый механизм последовательностей S-всплесков, основанный на эффекте изменения амплитудночастотного спектра непрерывного излучения при прохождении необыкновенных электромагнитных волн с частотами вблизи частоты отсечки через область с нестационарным возмущением планетарного магнитного поля в ионосфере Юпитера. Существуют две причины возникновения импульсного излучения. Во-первых, они возникают благодаря нестационарному изменению величины частотной дисперсии и, следовательно, групповой скорости необыкновенных электромагнитных волн,

обладающих вблизи частоты отсечки сильной частотой дисперсией. В-вторых, уходом части излучения в область задержки из-за увеличения частоты отсечки, вызванной увеличением магнитного поля на трассе распространения излучения (диодный эффект). Период возникающих последовательностей импульсов определяется характерным масштабом возмущения магнитного поля. Эти возмущения временным ΜΟΓΥΤ представлять собой магнитогидродинамические колебания, возбуждаемые в ионосфере планеты альфеновскими волнами или потоками ускоренных заряженных частиц, идущими спутника Ио. Численным моделированием распространения необыкновенной от электромагнитной волны с частотой, близкой к частоте отсечки, в магнитоактивной с нестационарным возмущением магнитного поля продемонстрировано плазме возникновение структур, наблюдаемых в экспериментах на динамических спектрах декаметрового радиоизлучения Юпитера. В частности, была получена структура, указанная в предыдущем пункте в виде квазипериодической последовательности излучения, частотная полоса которых представляет синусоиду, дрейфующую в сторону низких частот. Из сопоставления рассчитанного динамического спектра с наблюдаемым были найдены амплитуда и характерные времена МГД-колебаний в области генерации излучения.

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. 2010. doi:10.1029/2010JA016041 (in press) Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E., Khodachenko M.L., Rucker H.O., Panchenko M. Acceleration of electrons in

Titan's Ionosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, A03212. doi:10.1029/2008JA013958

3.4.2. Исследование вклада полей коротации в атмосферную токовую систему при опережающем вращении слоя ионосферной плазмы (ИПФ)

Проанализировано распределение атмосферных полей и токов, возникающих вследствие эффекта униполярной индукции при радиально-неоднородном вращении ионосферы. Токовая система рассматривались в рамках модели, состоящей из хорошо проводящей вращающейся планеты с дипольным магнитным полем, вращающейся вместе с планетой атмосферы с экспоненциальным профилем проводимости, ионосферы с произвольным радиальным профилем угловой скорости и расположенной за пределами ионосферы области магнитосферной плазмы. Точное решение задачи при произвольном радиальном профиле угловой скорости ионосферной плазмы представлено в квадратурах. Для случая слоя ионосферной плазмы с однородным по радиусу вращением найдено решение задачи в элементарных функциях. Определены критерии, при выполнении которых необходимо учитывать влияние ионосферного течения на атмосферную токовую систему. Полученное точное решение использовано для количественной оценки влияния супервращения земной ионосферы на поля и токи в нижней атмосфере на основе данных о параметрах ионосферного течения. Прежде всего, показано, что наличие слоя ионосферной плазмы с опережающим вращением всегда приводит к ослаблению электрических полей и токов, возникающих в нижней атмосфере благодаря эффекту планетарного электрического генератора. Для количественных оценок эффекта использовались усреднённые данные по скорости течения и толщине слоя ионосферной плазмы с опережающим вращением, поскольку, несмотря на многолетнюю историю косвенных наблюдений, однозначного ответа о параметрах ионосферного течения нет. Полагалось, что скорость течения на 10% превышает скорость вращения Земли, толщина слоя составляет 100 км, а эффективная проводимость ионосферной плазмы считалась равной педерсеновской проводимости в указанном интервале высот. Показано, что возникающие вблизи земной поверхности токи в высоких широтах (для полярных углов приблизительно до 55°) направлены вверх и составляют около 0,5 пА/м². Указанное значение по порядку величины близко к так называемому току хорошей погоды, текущему в глобальном конденсаторе Земляионосфера вследствие работы тропосферных источников атмосферного электричества и составляющему порядка –1 пА/м². Полный ток, вытекающий через земную поверхность в

высоких широтах и формирующий атмосферно-магнитосферную токовую петлю, в данном случае составляет около 24 А. Для сравнения отметим, что ток хорошей погоды. в этом же интервале широт составляет около –105 А. Широтная компонента плотности тока в нижней атмосфере пренебрежимо мала по сравнению с радиальной компонентой, однако в верхних слоях атмосферы широтная компонента плотности тока на два порядка величины превосходит радиальную компоненту, что обусловлено замыканием на этих высотах ионосферно-магнитосферной части возникающей токовой петли.

Рассмотрено влияние параметров ионосферного слоя (проводимости, скорости вращения, толщины) на ослабление полей и токов планетарного генератора в нижней атмосфере. Показано, что рост толщины слоя приводит к монотонному уменьшению атмосферных токов, при этом указанное ослабление при прочих равных условиях более существенно в случае, когда эффективная проводимость ионосферной плазмы превосходит эффективную проводимость участка токовой петли за пределами ионосферы. Аналогичный эффект наблюдается при росте скорости вращения слоя. Однако в отличие от предыдущего случая изменение данного параметра может привести к смене знака полей и токов, Получены индуцируемых в нижней атмосфере. аналитические выражения, иллюстрирующие зависимость приземного электрического поля от параметров слоя с опережающим вращением. На качественном уровне представленные выше результаты можно интерпретировать следующим образом. В рамках рассматриваемой модели поля и токи в нижней атмосфере определяются движением двух хорошо проводящих сред за пределами атмосферы: ионосферного слоя с опережающим вращением и магнитосферной плазмы. Каждая из этих сред противоположно вращается относительно намагниченной планеты, что приводит к генерации вблизи земной поверхности электрических полей противоположного направления за счёт эффекта униполярной индукции. Величина генерируемых полей определяется эффективной удельной проводимостью сред, скоростью их относительного вращения и толщиной слоя с опережающим вращением. Суперпозиция генерируемых полей определяет суммарный эффект планетарного электрического генератора в нижней атмосфере.

Полученные результаты могут оказаться полезными при построении более общих моделей глобальной цепи в земной атмосфере, а также при оценке влияния глобальных ионосферных течений на распределение полей и токов в нижних слоях атмосферы.

- Давыденко С.С. О влиянии ионосферных течений на поля и токи планетарного электрического генератора // Геомагнетизм и аэрономия, 2010 (в печати).
- Давыденко С.С., Мареев Е.А. Современное состояние и перспективы моделирования глобальной электрической цепи // сборник трудов XIV Всероссийской школы-конференции молодых учёных «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты», 18-21 мая 2010 года, Нижний Новгород, Россия. С.26-30.

3.4.3. Формирование азимутально симметричной компоненты возмущения магнитного поля (Dst вариации) осесимметричной компонентой кольцевого тока во время магнитных бурь на примере большой магнитной бури февраля 1986 г.

Проведено численное моделирование нелинейных изменений магнитного поля при возрастании давления во внутренних областях магнитосферы в осесимметричном случае при изотропии давления. Определена радиальная зависимость возмущения магнитного поля при заданном распределении давления плазмы. Получена зависимость возмущения магнитного поля у Земли от полного давления с учетом влияния магнитного поля токов в плазме на величину и распределение поля. Полученные решения применены при анализе большой магнитной бури февраля 1986 г., в ходе которой минимальная величина Dst вариации составляла -307 нТл. Использованы экспериментально измеренные вблизи экваториальной плоскости значения давления плазмы. Показано, что с учетом нелинейных эффектов величина наблюдаемой Dst вариации соответствует возмущению, вызываемому осесимметричной частью кольцевого тока. Результаты проведенного



нелинейного анализа подтверждают традиционную точку зрения о доминирующем вкладе кольцевого тока в качестве основного источника Dst вариации, подвергавшуюся за последнее время критике, основанной на предположении о значительном вкладе тока хвоста в данную вариацию.

Вовченко В.В., Антонова Е.Е., Нелинейное возмущение дипольного поля осесимметричным распределением плазмы, Геомагнетизм и аэрономия, т. 50(6), с. 768-777, 2010.

3.5. Генерация, распространение и взаимодействие электромагнитных излучений в магнитосферах планет, диагностика плазмы

3.5.1. Объяснение динамических спектров короткопериодических ОНЧ излучений с секундными периодами повторения спектральных форм (ИПФ)

В рамках оригинального формализма автором ранее было получено точное решение в виде распространяющегося между областями отражения электромагнитного солитона огибающей с частотным дрейфом заполнения в неоднородном плазменном мазере с неэквидистантым частотным спектром резонатора. Теория была применена для плазменного магнитосферного мазера, что позволило предсказать условия существования короткопериодических ОНЧ излучений с периодами повторения спектральных форм от 2 до 7 секунд [П.А. Беспалов. Пассивная синхронизация мод в мазерах с неэквидистантным спектром. ЖЭТФ, 1984, т. 87, № 12, .с. 1894-1904; Bespalov P.A. Effective saturation of absorption in a plasma magnetospheric maser. In book: Nonlinear Space Plasma Physics, R.Z.Sagdeev -Editor-in-Chief, American Institute of Physics, 1993, p.339-346], отвечающих солитонным решениям для огибающей пакета ОНЧ излучений. При реализации солитонного решения многократные свисты трасформируются в короткопериодические ОНЧ излучения.



Рис. 3: Многократные свисты (слева) имеют место, когда не существенны эффекты квазилинейной релаксации и проявляется только дисперсионное искажение сигнала. Короткопериодические ОНЧ

излучения (справа) имеют место, когда квазилинейная релаксация существенна и мощность источника частиц обеспечивает эффективное насыщение поглощения

Уровень экспериментальных данных в прошлом не давал возможности четко выделить короткопериодические ОНЧ излучения.

Развитие аналитического формализма дало возможность выразить феноменологические коэффициенты теории через конкретные характеристики электронных радиационных поясов и параметры магнитосферного резонатора. Результаты расчетов сопоставлены с высококачественными современными спутниковыми и наземными экспериментальными данными. В итоге проделанной работы четко выделены короткопериодические ОНЧ излучения и объяснены их основные свойства.



Рис. 4: Слева - чистые короткопериодические ОНЧ излучения с периодом повторения 3,7 с со спутника DEMETER; справа - короткопериодические ОНЧ излучения с периодом 1,7 с на фоне более низкочастотного процесса

Полученные результаты важны для диагностики магнитосферы, включая скрытые параметры, такие как величина и угловая зависимость мощности естественных источников энергичных электронов в области радиационных поясов.

Bespalov P.A., Parrot M., Manninen J. Short-periodic VLF emissions as solitary envelope waves in a

magnetospheric plasma maser // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2010. V. 72. P. 1275-1281.

Беспалов П.А. Некоторые новые возможности диагностики магнитосферы по характеристикам свистовых излучений. Геомагнетизм и аэрономия, 2010 (в печати).

Bespalov P. External periodic effects on VLF noise excitation // Book of Abstracts VERSIM, 2010, Prague, p. 17.

3.5.2. Ионно-звуковая неустойчивость и аномальная теплопроводность космической плазмы (ИПФ)

В рамках модельных расчетов показана возможность реализации ионно-звуковой неустойчивости в плазме без тока и потоков частиц, но с анизотропной функцией распределения, которая отвечает потоку тепла. Определен критический поток тепла, соответствующий порогу неустойчивости. Для солнечных условий критический поток тепла близок к известному экспериментально потоку тепла из короны в хромосферу на границе переходного слоя. Оценки показали, что вне активных областей и даже в активных областях с не самыми сильными магнитными полями ионно-звуковая неустойчивость может быть ответственна за формирование резкого температурного перепада.

Bespalov P.A., Savina O.N. Instability of ion-acoustic oscillations and anomalous thermal conductivity in the transition region of stellar atmosphere // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Optics-Astrophysics-Astronomy (ICOAA '10). University of Cambridge, UK, 2010, p. 103-107.

Savina O.N., Bespalov P.A. Ion-acoustic instability and anomalous thermal conductivity in the Solar transition region // Book of Abstracts X-th Hvar Astropysical Colloquium The Active Sun, Hvar, 2010, p. 16.

Беспалов П.А., Савина О.Н. Поток тепла как источник ионно-звуковых колебаний в космической плазме // Тезисы докладов конференции "Физика плазмы в солнечной системе", Москва, ИКИ РАН, 2010. С. 88.

3.5.3. Формирование каверн плотности с нестационарным электрическим полем и ускорение частиц в зоне авроральных продольных токов (ИПФ)

Проанализирован вопрос формирования мелкомасштабных каверн плотности с нестационарным электрическим полем в авроральной области земной магнитосферы. Показано, что вероятной причиной формирования каверн является превышение порогового значения для продольного электрического тока в кинетических альвеновских волнах. Рассмотрена линейная и нелинейная стадии неустойчивости возмущений плотности и электрического поля. Показано, что часть энергичных частиц, пересекающих изменяющиеся со временем каверны с меняющимся во времени электрическим полем ускоряются. По-видимому, этот процесс может быть отвественен за формирование потоков электронов и ионов, которые регистрируются в авроральной зоне продольных токов.

Беспалов П.А., Мизонова В.Г. Формирование каверн плотности с нестационарным электрическим полем в зоне авроральных продольных токов // Геомагнетизм и аэрономия, 2010 (в печати).

- Bespalov P.A., Mizonova V.G. Formation of density cavities with a nontationary electric field and particle acceleration in the auroral longitudinal current region // Тезисы докладов Международной конференции «Физика внутренней магнитосферы и авроральной области: актуальные задачи и методы их решения (проект РЕЗОНАНС)», ИКИ РАН, 2010.
- Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Беспалов П.А. Выступы плазмосферы и вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Геомагнетизм и аэрономия, 2010 (принята к печати).
- Barhhatova O., Barkhatov N., Bespalov P. Asymmetry of geomagnetic field horizontal compoments variation connected to field aligned currents appeared at early recovery phase in region of plasmospheric bulges. Geophysical Research Abstracts, 2010, v. 12, EGU2010-6570, 2010 EGU General Assembly.

3.5.4. Отклик дипольной антенны в движущейся изотропной плазме (ИПФ)

Проанализирован отклик дипольной антенны в движущейся изотропной плазме (скорость движения плазмы много больше тепловой скорости электронов) при падении на нее шумового и (или) регулярного (квазимонохроматического) излучения в виде плазменных колебаний и волн. Для шумового поля показано, в частности, что в аналоге формулы Найквиста для квазистационарных шумов для частот порядка плазменной частоты неравновесные шумы определяются эффективными потерями на излучение в нормальные и аномальные доплеровские гармоники. Причем, в качестве эффективного сопротивления излучения стоит величина, равная:

$$R_{eff} = \frac{\omega}{\omega_{Pe}} (R_n + |R_{an}|),$$

где R_n , R_{an} - сопротивления излучения в нормальные и аномальные доплеровские частоты. Это важный результат, поскольку сопротивление излучения в аномальные доплеровские частоты может быть отрицательным, и система может быть неустойчивой. Однако, что касается спектральной плотности шумовой ЭДС, то эта величина всегда положительна, поэтому и нормальные, и аномальные доплеровские гармоники вносят положительный вклад в эффективное сопротивление.

В случае регулярного излучения показано, что эффективная длина приемной антенны может сильно отличаться от «геометрической» длины диполя, что связано с особенностью дисперсии продольных волн. Как видно из вида поверхности волновых векторов (Рис. 6), область углов, где может происходить сильная группировка возбуждаемых волн, это направления возбуждения волн, близкие к направлениям асимптот. Здесь в заданное направление прихода энергии излучения в переизлученное поле дают вклад много (в асимптотическом пределе континуум) плоских волн.



Рис. 5: Поверхности волновых векторов для плазменных волн. Верхняя ветвь соответствует аномальным доплеровским частотам, нижняя ветвь – нормальным Доплеровским частотам. График слева отвечает частотам $W > W_p$, справа - частотам $W < W_p$.

Соответственно, отклик приемной антенны при падении на нее пакета плазменных волн в этом угловом интервале является резонансным, и, следовательно, эффективная длина ее может сильно возрастать. Это обстоятельство следует учитывать при анализе волновых измерений в космической плазме. На Рис. 7 приведены типичные зависимости эффективной длины от угла прихода излучения для нормальных доплеровских частот для превышения скорости плазмы над тепловой скоростью в три раза, когда частота



Рис. 6: Зависимость эффективной длины приемной антенны, нормированной на длину диполя в виде 2-х сфер, разнесенных на расстояние 2L, от угла прихода излучения. Рис.7а и 76 отвечают соответственно длине L, равной 5 и 0.5 дебаевским радиусам, при значениях угла ориентации $\alpha = 60^{\circ}$ и азимутального угла $\varphi = 15^{\circ}$. Расчет сделан для падающей волны, отвечающей возбуждению нормальных доплеровских частот и значениям M = 3.

излучения ^W больше или меньше плазменной частоты электронов.

Полученные особенности поведения шумов и эффективной длины имеют место также на низких частотах порядка плазменной частоты протонов в условиях, когда скорость плазмы много меньше тепловой скорости электронов, но много больше тепловой скорости протонов. Эти условия реализуются в плазме солнечного ветра. В плазме солнечного ветра тепловая скорость электронов основной компоненты на уровне орбиты Земли порядка $v_{Te} \approx 1200$ км/сек, тепловая скорость протонов $v_{Ti} \approx v_{Te} (m/M)^{1/2} \approx 27$ км/сек, и, следовательно, при скорости ветра порядка 300 км/сек $M_{eff} \approx 11, 2$.

Рассмотренный вариант дисперсии среды соответствует аналогу ионно-звуковых волн в движущейся изотропной плазме.

- Чугунов Ю.В., Фиала В. Резонансный зонд в движущейся плазме // Известия вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, №12. С. 960-971.
- Fiala V., Hayosh M., Souček J., Santolík O., Chugunov Yu. V., Pickett J. S. Observation of Langmuir waves in the solar wind and the role of the antenna effective length // AIP Conference Proceedings. 2010. V. 1216. P. 312-316.
- Чугунов Ю.В. К теории приемной антенны в движущейся плазме // Тезисы докладов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», г. Москва, 8-12 февраля 2010 г. С.89-90.

3.5.5. Анализ данных эксперимента ROMAP с к/а ROSETTA (ИКИ)

Продолжалась работа по анализу данных по трассе плазменного прибора РОМАП, установленного на к/а РОЗЕТТА для исследования плазменной структуры на поверхности кометы Чурумова-Герасименко после 2014 г. В частности, проведен анализ поведения канальных электронных умножителей – каналотронов, в экстремальных условиях. Данные показывают, что прибор РОМАП функционирует нормально.

A. Remizov, SPM/ROMAP – Plasma Monitor onboard the ROSETTA Lander PHILAE: Current status, calibration results, in-flight tests, common work with orbiter plasma instrument RPC – comparison of electron measurements, MPS Katlenburg-Lindau Workshop, Germany, 20 August 2010.

А.П. Ремизов, Г. Аустер, И. Апати, Х. Розенбауер, М. Хильхенбах, Особенности работы вторичных электронных умножителей (каналотронов) при высоких положительных и отрицательных температурах, Конференция "Физика плазмы в солнечной системе" Сборник тезисов, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2010 г., с. 60.

3.5.6. Использование параметров самоподобия аврорального свечения для определение требований к пространственно-временному разрешению авроральных камер на космических аппаратах (ПГИ)

Исходя наблюдаемого в природе пространственно-временного самоподобия ИЗ обоснованы аврорального свечения. впервые согласованные требования к пространственному и временному разрешениям авроральных камер, устанавливаемых на спутниках. Использованные степенные индексы, характеризующие пространственновременное самоподобие аврорального свечения, получены из данных спутника Полар и наземных телевизионных наблюдений ПГИ в обс.Баренцбург.

Ранее по данным спутника Полар и наземным телевизионным наблюдениям ПГИ в обс.Баренцбург были получены степенные индексы, характеризующие в широком диапазоне масштабов самоподобие (скейлинг) простанственно-временной структуры полярных сияний во время суббуревых активизаций. Знание этих индексов позволило получать связь между пространственными и временными масштабами в структуре активных форм полярных сияний, на основе чего построена эмпирическая *функция масштабирования разрешения*, связывающая пространственное и временное разрешения, необходимые для регистрации структуры свечения спутниковыми авроральными камерами без потерь. Рисунок иллюстрирует то, как удовлетворяют этим требованиям приборы на спутниках POLAR, IMAGE и на планируемом спутнике PCW.



Рис. Эмпирическая функция масштабирования разрешения (чёрная линия) с 95% доверительными интервалами (серые линии). Синие символы – характеристики авроральных приборов на спутниках POLAR и IMAGE, красный символ – авроральная камера на планируемом канадском спутнике PCW. Горизонтальные линии у каждого символа отмечают пространственное разрешение на расстоянии 4 Re и в апогее каждого спутника.

Uritsky V.M., E. Donovan, T. Trondsen, D. Pineau, and B.V. Kozelov, Data-derived spatiotemporal resolution constraints for global auroral imagers. *J. Geophys. Res.*, 115, A09205, doi:10.1029/2010JA015365, 2010.

3.5.7. Обнаружение и интерпретация нового типа ОНЧ излучений на спутнике DEMETER (ПГИ И ИКИ)

На спутнике DEMETER обнаружены необычные ОНЧ сигналы, спектрограммы которых имели форму клина. Показано, что верхние частоты отсечки клиновидных спектрограмм объясняются особенностями недактированного распространения ОНЧ волн во внутренней магнитосфере, а нижние частоты отсечки - отражением квазирезонансных ОНЧ волн в верхней ионосфере

На низколетящем спутнике DEMETER (700 км) в время грозовой активности обнаружены необычные OHU сигналы, спектрограммы которых имеют форму клина, см. рис.1. Мы показали, что спектрограммы типа клина формируются преимущественно OHU свистами, пришедшими на спутник из другого полушария. Верхние частоты отсечки свистов на спектрограммах быстро меняются при движении спутника, примерно пропорционально L^{-3} , где L оболочка спутника. Напротив, нижняя частота обрезания на спектрограммах почти постоянна; такое поведение верхних и нижних частот свистов и формируют клин на спектрограммах при движении спутника.

Наблюдаемые спектрограммы интерпретированы на основе недактированного распространения ОНЧ волн во внутренней магнитосфере. Появление верхних частот осечки связано с тем, что существует максимальная L оболочка, на которую волна фиксированной частоты может прийти из противоположного полушария независимо от положения точки старта. Показано, что это максимальная L оболочка уменьшается с увеличением частоты волны в соответствии с наблюдаемой в эксперименте зависимостью верхней частоты обрезания свистов от L.

При недактированном распространении ОНЧ волны достигают противоположной полусферы с большими углами, часто близкими к резонансным углам свистовых волн. Эти квазирезонансные волны отражаются на частотах вблизи частоты нижнего гибридного резонанса (НГР). Используя локальные измерения концентрации электронов и ионов, были промоделированы высотные профили частоты НГР (f _{НГР}), которые показали, что в рассматриваемых событиях высота максимальной частоты НГР была выше орбиты спутника DEMETER, а максимальная частота НГР была ниже для дневных событий (6-9 кГц), чем для ночных – 9-12 кГц. Наблюдаемые нижние частоты ОНЧ сигналов в клиновидных спектрограммах были ниже на дневных пролетах DEMETER, чем на ночных (см. рис.1 а и в) и соответствовали частотам максимума НГР, полученным в соответствующих моделях. Поэтому мы объясняем обрезание на нижней частоте в клиновидных структурах отражением квазирезонансных ОНЧ волн на максимуме частоты НГР выше спутника.



Рис.1. Примеры спектрограмм типа клина, наблюдаемые на спутнике DEMETER при движении спутника в сторону больших L-оболочек для дневных (а) и ночных (в) пролетов.

Shklyar, D. R., Parrot, M., Chum, J., Santolik, O., Titova, E. E., On the origin of lower- and upper-frequency cutoffs on wedge-like spectrograms observed by DEMETER in the midlatitude ionosphere *J. Geophys. Res.*, V. 115, A5, DOI:10.1029/2009JA014672.

3.5.8. Изучение механизма генерации геомагнитных пульсаций убывающего периода (ПГИ)

С целью изучения механизма генерации геомагнитных пульсаций IPDP проведены расчеты инкремента циклотронных волн, возбуждаемых при контакте дрейфующих энергичных частиц, инжектированных во время суббури, с холодной плазмосферной плазмой. Показано, что модель ионно-циклотронного взаимодействия ULF-волн с дрейфующим протонным облаком объясняет основные наблюдаемые характеристики геомагнитных пульсаций IPDP, такие как длительность, изменение частоты и их зависимость от MLT. Ключевыми параметрами модели оказались начальная энергия инжектированных частиц и их анизотропия.

Предполагается, что причиной появления геомагнитных пульсаций IPDP является циклотронное взаимодействие ионов плазмы с УНЧ волнами. Инкремент ионноциклотронной неустойчивости рассчитывается по модели Kennel and Petschek (1966), обобщенной на случай двуионной плазмы (рассматриваются протоны и ионы He⁺, наличие последних существенно влияет на зависимость инкремента от частоты в диапазоне генерации IPDP).



Рис. Локальный и интегральный инкремент неустойчивости.

Работа докладывалась на конференциях:

1) «Состояние и перспективы развития геофизических исследований в высоких широтах», Апатиты, 16-17 сентября 2010 г. и

2) 8th International Conference "Problems of Geocosmos", St.Petersburg, Petrodvorets, Russia, 20-24 September 2010

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

4.1.1. Исследованы морфология и причины образования аномалии моря Уэдделла (Weddell sea anomaly, WSA) в южном летнем полушарии и Якутской аномалии в северном летнем полушарии (ИЗМИРАН)

Исследованы морфология и причины образования аномалии моря Уэдделла (Weddell sea anomaly, WSA) в южном летнем полушарии и Якутской аномалии в северном летнем полушарии с помощью количественных расчетов и качественного анализа. Сделаны следующие выводы.

1) По данным спутника Интеркосмос-19 для высокой солнечной активности (1979-1980 г.) впервые построено и проанализировано глобальное распределение foF2 для околополуденных и послеполуночных часов в южном летнем полушарии. Для сравнения построено аналогичное распределение fpF2 (~foF2) по данным спутника CHAMP для минимума солнечной активности (2005-2006 г.). Сравнение данных спутников ИК-19 и CHAMP показывает, что основные характеристики WSA подобны для условий высокой и низкой солнечной активности. Исследована динамика развития WSA с местным временем.

2) По данным спутника ИК-19 впервые выделена зона аномального поведения foF2 (WSA) в летнем южном полушарии. Она занимает практически все долготы западного полушария, при этом максимальное превышение ночных значений foF2 над дневными достигает 4-5 МГц на долготах 255-315° и широтах 50-55° ILAT. Зона аномалии намного больше моря Уэдделла и никак не связана с ним, поэтому более оправдано для нее название зона АСВК – зона аномальных суточных вариаций электронной концентрации.

3) По данным спутника ИК-19 впервые выделена зона аномального поведения foF2 в летнем северном полушарии. Она занимает меньшую, чем в южном полушарии, но довольно значительную область на долготах 80-220°E и широтах 45-75°N. При этом максимальное превышение ночных значений foF2 над дневными достигает 2-2.5 МГц на долготах 120-150° и широтах около 60°N (вблизи Магадана и Якутска).

4) WSA определяется низкими значениями foF2 в дневной ионосфере и более высокими значениями в ночной ионосфере на долготах западного полушария. Поэтому на основе глобального распределения электронной концентрации в летнем южном полушарии были исследованы долготные вариации параметров ионосферы и термосферы, что позволяет говорить о причинах ACBK. Эти причины по разному проявляются в геомагнитной и географической системах координат.

а) В геомагнитной системе координат (на фиксированной широте 52.5° ILAT) ДЭ определяется изменениями с долготой уровня солнечной ионизации, скорости вертикального дрейфа плазмы, отношения [O]/[N₂] и температуры термосферы Tn. Вариации этих параметров устроены таким образом, что на долготах западного полушария они обеспечивают более высокие значения foF2 ночью, чем днем. Наибольший вклад в ДЭ вносят солнечная ионизация и нейтральный ветер, определяющий вертикальный дрейф плазмы.

б) В географической системе координат ситуация более сложная. Долготные вариации foF2 в дневной высокоширотной ионосфере в большей степени определяются высыпаниями частиц в области каспа и примыкающим к нему провалом ионизации, чем нейтральным ветром. В ночной высокоширотной ионосфере нейтральный ветер безусловно играет доминирующую роль в создании сильнейшего ДЭ с максимумом foF2 на долготах аномалии. Но необходимо также учитывать и влияние главного ионосферного провала, а следовательно и механизмов, его создающих.

в) Качественный анализ, проведенный для Якутской аномалии полностью подтверждает выводы, сделанные при анализе причин WSA.

Итак, расчеты и основанный на них качественный анализ показывают, что главной причиной ACBK является нейтральный ветер. Эффект нейтрального ветра определяется долготными вариациями его скорости и зависимостью от склонения и наклонения геомагнитного поля. Привлечение других механизмов в роли главных причин аномалии, как например, потоков из плазмосферы, электрических полей, процессов в Южноатлантической аномалии и т.п. не представляется оправданным. Но не исключено, что эти причины могут играть дополнительную роль в создании аномалии.



Рис. Якутская аномалия в летнем северном полушарии (вверху) и аномалия моря Уэдделла в летнем южном полушарии (внизу) как разница между ночными и дневными значениями foF2. Я – Якутск, М – Магадан.

Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А. Морфология и причины аномалии моря Уэдделла // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т.51. № 3. (в печати).

4.1.2. Ионосферный и геомагнитный отклик на межпланетные ударные волны (ИКИ)

Выделены 2 типа откликов ионосферы и геомагнитного поля на межпланетные ударные волны (SSC) по данным доплеровского зондирования и наземных магнитометров: долгопериодные вариации длительностью ~10 мин и быстрый положительный ~1 мин импульс. Численное моделирование показало, что долгопериодные вариации являются результатом возникновения глобального электрического поля угро-вечер в магнитосфере. Для интерпретации быстрого отклика построена аналитическая модель вариаций доплеровской скорости. вызываемых магнитосферными альвеновскими И магнитозвуковыми волнами в рамках приближения тонкой ионосферы. Новая аналитическая модель превосходит существовавшие численные модели, предложенные для описания взаимосвязей между геомагнитными вариациями и доплеровским сдвигом частоты, и дает возможность легко рассчитать доплеровский отклик Х- и О-моды радиоволны на альвеновскую ИЛИ магнитозвуковую волны. Характеристики зарегистрированных импульсов хорошо объясняются эффектом вертикального смещения ионосферной плазмы, вызываемого индукционным электрическим полем на фронте магнитозвуковой волны. Работа выполнена в сотрудничестве с Институтом космических исследований АН Китая (CSSAR).

Pilipenko V., E. Fedorov, K. Yumoto, A. Ikeda, and T.R. Sun, An analytical model for Doppler frequency variations of ionospheric HF sounding caused by SSC, J. Geophys. Res., 115, A10228, doi:10.1029/2010JA015403, 2010.

4.1.3. Исследование процессов нагрева и охлаждения тепловой плазмы в земной плазмосфере (ИКИ)

Детализирован физический механизм и построена модель перемещения дрейфовой оболочки от Земли, вызванного уменьшением магнитного поля во внутренней плазмосфере при развитии магнитной бури B_{dst} . Показано, что в некоторых случаях третий адиабатический инвариант сохраняется и в процессах с характерным временем намного меньшим, чем период дрейфа заряженных частиц вокруг Земли. Понижение температуры протонов T(r) на геоцентрическом расстоянии r вблизи экваториальной плоскости по сравнению с первоначальной $T_{in}(r)$ может быть описано как:



 $\frac{T(r)}{T_{in}(r)} = \left(1 + \frac{B_{dst}r^3}{B_e r_e^3}\right) / \left(1 - \frac{B_{dst}r^3}{2B_e r_e^3}\right)^{3+p},$ где B_e – магнитное поле на земном экваторе r_e и $p = -rT'_{in}(r)/T_{in}(r)$ – показатель степенной зависимости $T_{in}(r)$. На Рис. 1 показана зависимость от $L = r/r_e$ величины уменьшения температуры протонов в плазмосфере время BO геомагнитных бурь различной интенсивности B_{dst} , рассчитанная соответствии R C приведенным выше выражением, удовлетворительно описывающая наблюдавшееся в экспериментах на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5 понижение температуры протонов вблизи экваториальной плоскости.

Г.А. Котова, М.И. Веригин, В.В. Безруких, В.В. Богданов, А.В. Кайсин, Охлаждение ионов в плазмосфере на начальной стадии магнитной бури: моделирование динамики температуры, V международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 2 - 7 августа 2010 г., Сб. докладов, стр.76-79.

М.И. Веригин, Г.А. Котова, В.В. Безруких, В.В. Богданов, А.В. Кайсин, Дрейф ионов во внутренней плазмосфере Земли во время магнитосферных возмущений и динамика температуры протонов, Геомагнетизм и аэрономия, 2011, том 51, № 1 (принята в печать).



4.1.4. Исследование влияния поляризационного джета на структуру субавроральной ионосферы (ИКИ)

Исследовано влияние поляризационного джета на структуру субавроральной ионосферы с помощью численного моделирования области F высокоширотной ионосферы. Для этого в модельных расчетах в полосе поляризационного 1-2 шириной градуса дополнительно задавалось электрическое поле северного направления в

диапазоне от 5 до 100 мВ/м.

Результаты модельных расчетов сопоставлены с экспериментальными данными наземных станций ионосферного зондирования в конкретные дни весеннего равноденствия. Показано удовлетворительное согласие модельных значений электронной концентрации с ионосферными плазменными частотами, измеренными с наземных станций.

А.Е. Степанов, И.А. Голиков, В.И. Попов, Е.Д. Бондарь, В.Л. Халипов, Структурные особенности субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета, Геомагнетизм и аэрономия, 2011, том 51, № 3 (принята в печать).

4.1.5. Прохождение свистовых волн через ионосферу (ИКИ)

Теоретически исследован вопрос о выходе свистовой волны, распространяющейся по магнитосферной траектории, в ионосферу и атмосферу Земли. Этот процесс связан с трансформацией волны, распространяющейся В магнитоактивной плазме. В электромагнитную волну, которая может распространяться в свободном пространстве. Эта трансформация, которая происходит в существенно неоднородной столкновительной плазме, требует для своего описания волнового подхода. Наличие в свистовом диапазоне нераспространяющейся моды делает численное решение соответствующих уравнений нетривиальной задачей. Получено поле свистовой волны, падающей на ионосферы сверху, во всем диапазоне высот, и вычислен коэффициент отражения волны как функция частоты. Дано объяснение квазипериодического поведения коэффициента отражения, что связано с резонансным характером поглощения волн в нижней ионосфере.

I.V. Kuzichev, D.R. Shklyar. On full-wave solution for VLF waves in the near-Earth space, J. Atm. Solar-Terr. Phys., 72, 1044–1056, doi:10.1016/j.jastp.2010.06.008, 2010.

4.1.6. Регистрация волноводной моды в источнике АКР (ИКИ)

При анализе Аврорального Километрового Радиоизлучения во время взрывной фазы геомагнитной суббури было найдено, что при прохождении полярной границы авроральной области регистрируется низкочастотное излучение, частота которого на 10-20 кГц выше, чем локальная гирочастота электронов. Нижняя граница спектра этого излучения изменяется на 20-30 кГц за 4-6 минут, изменение может носить как монотонный характер, так и иметь минимум. Более детальный анализ показал, что это излучение представляет собой драматическое увеличение интенсивности АКР на нижней частоте обрезания. Такое увеличение авторы интерпретировали как наблюдение волноводной моды в источнике АКР: поскольку антенна прибора ПОЛЬРАД представляет собой короткой диполь (база электрической антенны 22 метра, что много меньше длины волны ЭМ излучения), то медленная волноводная мода лучше согласована с приемной антенной и наводит на ней большее напряжение. Наблюдаемая в эксперименте амплитудная модуляция волноводной моды интерпретируется авторами, как результат



Спектрограмма низкочастотного АКР



Схема, объясняющая видимое усиление амплитуды излучения для медленных волн

интерференции волн в волноводе, стенки которого «гофрированы» гидромагнитными колебаниями, которые наблюдаются в этой области.

I.L. Moiseenko, M.M. Mogilevsky, D.V. Chugunin, T.V. Romantsova, J. Hanasz, Waveguide modes in the AKR source, PRE-VII, Graz, Austria, September 15-17, 2010, p. 101.

4.1.7. Ускорение ионосферных частиц на полярной границе аврорального овала (ИКИ)

На основе результатов измерения на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 параметров заряженных частиц и электромагнитного излучения было установлено, что при возмущенных геомагнитных условиях, когда полярная граница овала смещается в сторону полюса, в узкой области в районе границы наблюдаются интенсивные потоки горячих ионов, идущих из ионосферы. Оценки «классического» механизма разогрева косыми альвеновскими волнами показывают, что интенсивность последних явно не достаточна для такого разогрева. Предложен механизм, связанный с инжекцией плазмы из хвоста магнитосферы и пространственного разделения электронов и ионов. Оценки необходимого времени пробега и энергетические характеристики ускоренных ионов хорошо согласуются с результатами измерений.



Д.В. Чугунин, И.Л. Моисеенко, М.М. Могилевский, Т.В. Романцова, Б. Бойчев, Ж.-А. Сово, Я. Ханаш, Нагрев ионосферных ионов на полярной кромке авроральной области, конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 8-12 февраля 2010 г., ИКИ РАН, Сб. тезисов, с. 84.

Chugunin, Dmitriy; Mogilevsky, Mikhail; Moiseenko, Irina; Romantsova, Tatiana; Hanasz, J.; Sauvaud, Jean-Andre, Heating of ionospheric ions on polar border of auroral region, 38-th General Assembly COSPAR, D-31-0061-10, Bremen, Germany, Final Program, p.114, 2010.

4.1.8. Изучение связи геомагнитных пульсаций с ионосферной конвекцией и высыпаниями (ИКИ и ИФЗ)

1). Выполнен анализ одновременных наблюдений вариаций электрического поля и скорости конвекции в ионосфере Земли на радарах системы STARE и EISCAT и геомагнитных пульсаций типа Pc5 на сети скандинавских магнитометров IMAGE. Выявлены неизвестные ранее эффекты возбуждения квазипериодических ионосферных неоднородностей, связанных с геомагнитными пульсациями резонансной природы. С помощью специально разработанных программ проведено исследование пространственно-временной динамики ионосферного электрического поля по данным наблюдений скорости конвекции на радарах STARE и EISCAT, в результате чего

построены кеограммы геомагнитных и ионосферных пульсаций с разрешением, значительно превышающим наземные данные. Установлено, что на всех исследуемых широтах авроральной зоны спектры геомагнитных пульсаций и спектры вариаций электрического поля в слое Е ионосферы на высотах 100-120 км совпадают. Показана возможность одновременного возбуждения резонансных колебаний на частоте около 3 мГц в двух областях широт, пространственно разделенных плазмопаузой.

2). Выполнен анализ взаимосвязи различного масштаба электромагнитных волн в магнитосфере (геомагнитных пульсаций Рс5 в полосе частот 1-5 мГц и вистлер моды ОНЧ-хоров в полосе частот 0.7-3.0 кГц) с высыпанием в ионосферу энергичных (20-40 кэВ) электронов, определяемых по данным риометрических измерений на частоте 30 МГц. наблюдения на скандинавском профиле станций сопоставлены со Наземные спектральными характеристиками солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП). Обнаружен общий спектральный максимум на частоте 2 мГц в динамическом давлении солнечного ветра, Вz-компоненте ММП, интенсивности ОНЧ-хоров, вариациях риометрического поглощения и амплитуде геомагнитных пульсаций, наблюдаемых одновременно в очень широком диапазоне широт – от авроральной зоны до геомагнитного экватора. Наиболее вероятным агентом, модулирующим вариации высыпаний энергичных электронов и интенсивность ОНЧ-хоров может быть компонента полоидальных Рс5 пульсаций, возбуждаемых в сжатия магнитосфере Земли квазипериодическими вариациями динамического давления солнечного ветра.

Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Власов А. А., Успенский М. В., Кауристи К. Послеполуденные геомагнитные пульсации *Pc5* на земной поверхности и в ионосфере (радары STARE), Геомагнетизм и Аэрономия, том 50, № 3, с. 344–353, 2010.

Manninen, J., N. G. Kleimenova, O. V. Kozyreva, and T. Turunen, Pc5 geomagnetic pulsations, pulsating particle precipitation, and VLF chorus: Case study on 24 November 2006, J. Geophys. Res., 115, A00F14, doi:10.1029/2009JA014837, 2010.

4.1.9. Анализ связи долготных распределений F-рассеяния с неоднородностями плотности плазмы в окрестности геомагнитного экватора (ИКИ)

Проведен анализ результатов наблюдений на спутнике "КОСМОС-900" неоднородностей плотности плазмы в области геомагнитного экватора и долготных распределений экваториального *F*-рассеяния по данным спутника "ИНТЕРКОСМОС-19". Показано, что зависимость распространения радиосигналов в ионосфере от геофизических параметров связана с развитием электростатической неустойчивости неоднородной ионосферной плазмы. Долготная зависимость *F*-рассеяния может отображать влияние на ионосферу энергетических источников, расположенных вне ионосферного слоя, рассеивающего радиоимпульс. Проявление долготного эффекта в экваториальном *F*-рассеянии в области Атлантики можно объяснить влиянием конусной неустойчивости на электродинамику плазмы в Южно-Атлантической геомагнитной аномалии.

Г. Л. Гдалевич, А. Х. Депуева, Н. И. Ижовкина, В. Д. Озеров, Неустойчивые плазменные неоднородные структуры в верхней ионосфере и F-рассеяние, Геомагнетизм и Аэрономия, 50, No. 1, 72-81, 2010.

4.1.10. Неустойчивость экмановского типа в Е-слое ионосферы (ИКИ)

На основании определённой аналогии физических условий в области верхней атмосферы, переходной от мезосферы к нижней термосфере (МНТ) (~ 85-110 км), и атмосферном пограничном слое (АПС) впервые для верхней атмосферы с учетом плазменной компоненты получены оценки спиральности и проанализирована неустойчивость экмановского типа. Проведенный расчет ориентации образующихся при этом периодических структур согласуется с экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют по-новому интерпретировать динамические процессы на высотах

МНТ, где механизмы неустойчивостей экмановского типа ранее не рассматривались. Предложен механизм образования фронтальных структур в Е области ионосферы основанный на неустойчивости экмановского типа, когда важным оказывается учет спиральности крупномасштабного потока и турбулентности в нейтральной компоненте слабоионизованной плазмы ионосферы. Предполагается исследование развития структур в условиях сопоставимого вклада магнитного поля и силы Кориолиса, для высот, переходных между Е и F слоями ионосферы.

О.Г.Чхетиани, С.Л.Шалимов, Спиральность в верхней атмосфере и неустойчивости экмановского типа, ДАН, том 431(1), с. 113–118, 2010.

4.1.11. Исследование влияния солнечного ветра на ионосферу Земли по данным Навигационных спутниковых систем.

Анализ влияния солнечных вспышек на экваториальную ионосферу по данным систем GPS/ГЛОНАСС (ИРЭ)

На основе результатов обработки данных измерений навигационных приемников, расположенных в экваториальной зоне, рассмотрены ионосферные эффекты солнечной вспышки 28 октября 2003 года. Показано, что реакция экваториальной ионосферы отличается от среднеширотной ионосферы южного и северного полушарий. В частности, выявлено наличие периодических флуктуаций. Период флуктуаций составил, с точностью до дискретности выдачи данных, 60 сек. Указанные флуктуации наблюдались на станциях, расположенных в разных часовых поясах, местное время в которых составило UT±4 часа. Значительное изменение электронного содержания наблюдалось в течение нескольких минут, в то время как интенсивность рентгеновского излучения наблюдалась вплоть до 24 часов. Показано, что время релаксации ионосферы составило $\tau_p~2$ часа, а скорость изменения полного электронного содержания достигла предвелышечного уровня около 13 часов (рис.). Поведение максимума скорости изменения полного электронного содержания в целом соответствует реакции среднеширотной ионосферы, но его значение более чем в 2,5 раза больше.



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 // УФН 2010. Т.180. С. 542–548.

Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 6. С.1-16.

4.1.12. Метод спутникового мониторинга высоты, наклона и горизонтального смещения плазменных слоев в ионосфере Земли и планет, основанный на

выявленной связи между интенсивностью и производными по времени фазы зондирующих радиоволн (ИРЭ)

A) Обоснована теоретически и подтверждена экспериментально в результате анализа голограмм, зарегистрированных в экспериментах радиопросвечивания ионосферы Земли и Венеры, осуществленных в ходе спутниковых миссий GPS/CHAMP, GPS/FORMOSAT-3, GPS/MET, MUP/GEO и BEHEPA 15,16, однозначная связь между интенсивностью и производными по времени фазы прошедших через исследуемую среду зондирующих радиоволн. Развитый метод позволил впервые определять высоту, наклон и горизонтальное смещение ионосферных слоев, раздельно измерять параметры слоистых и турбулентных структур, что было затруднительно ранее при радиозондировании на трассах спутник.

основе выявленной Ha связи разрабатывается технология глобального мониторинга ионосфер Земли И планет, апробированная при измерениях высоты и наклона слоев, а также интегрального поглощения, В экспериментах радиопросвечивания на спутниковых трассах вблизи Земли и на радиолинии искусственный спутник Венеры-Наземный пункт в дециметровом и сантиметровом диапазонах радиоволн. анализа Из радиозатменных данных следует, что производные по времени фазы несущей (эйконала) И доплеровского сдвига частоты, а также интенсивность сигналов (определяемая, в частности. S₄), инлексом являются важнейшими параметрами, необходимыми для радиовидения слоев в ионосфере.



Б) Анализ данных спутника СНАМР продемонстрировал важность амплитудного канала спутниковых радиоголограмм для классификации ионосферного влияния на сигналы радиопросвечивания. Предварительный анализ выявил пять типов ионосферного воздействия на сигналы радиопросвечивания на высотах перигея луча 40-90 км: 1) спокойная ионосфера, 2) изолированные квазирегулярные вспышки (возможен вклад наклонных спорадических Е-слоев), 3) сеанса с квазипериодическими изменениями амплитуды и фазы (возможный источник – волновые структуры в электронной концентрации), 4) дифракционные явления с явно выраженной дифракционной картиной амплитуды и фазы и 5) явления с шумовым вкладом ионосферных возмущений в амплитуду (рисунок). Шумовые и квазирегулярные амплитудные вариации сигналов радиопросвечивания соответствуют ранее описанным С- и S- типам амплитудный сцинтилляций в транс-ионосферных линиях связи Спутник-Земля. Анализ данных СНАМР указывает на возможность идентификации, определения местоположения и оценки распределения электронной концентрации и ее градиента в наклонных ионосферных слоях. Проведенные исследования показали необходимость изучения амплитудных и фазовых вариаций сигналов навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС

предложенным методом для исследования механизма взаимодействия между солнечной активностью и процессами в ионосфере.

- Liou Y.A., A.G. Pavelyev, S.S. Matyugov, O.I. Yakovlev, J. Wickert. Radio Occultation Method for Remote Sensing of the Atmosphere and Ionosphere // Edited by Y.A. Liou INTECH Published by In-The Olajnica 19/2, 32000 Vukovar, Croatia, 170 pp. 45 ill., ISBN 978-953-7619-60-2.
- 2. O.I. Yakovlev, J. Wickert, A.G. Pavelyev, G.P. Cherkunova, V.A. Anufriev. Measurement of polar ionosphere at satellite-to-satellite paths during strong solar flare activity // Acta Astronautica. 2010. V. 67. P. 315-323.
- 3. Pavelyev, A.G., Y.-A. Liou, J. Wickert, T. Schmidt, A.A. Pavelyev, and S.S. Matyugov. Phase acceleration: a new important parameter in GPS occultation technology // GPS Solutions 2010. V. 14. № 1. P. 3-14. doi:10.1007/s10291-009-0128-1.
- Pavelyev A.G., Y.-A. Liou, J. Wickert, K. Zhang, C.-S.Wang, and Y. Kuleshov. Analytical model of electromagnetic waves propagation and location of inclined plasma layers using occultation data // Progress in Electromagnetics Research (PIER). 2010. V. 106. P. 177-202. doi: 10.2528/PIER10042707.
- 5. 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 // УФН 2010. Т.180. С. 542–548.
- Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Wickert J., Gavrik A.L., Lee C.C. Eikonal acceleration technique for studying of the Earth and planetary atmospheres by radio occultation method // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. 1-5. doi:10.1029/2009GL040979, L21807.

4.2. Исследование ионосфер планет земной группы

4.2.1. Исследование влияния зональных ветров на концентрацию положительных и отрицательных ионов, и ионный состав нижней атмосферы Марса (ИКИ)

Проведено количественное моделирование влияния зональных ветров на слой D марсианской ионосферы. Скорости ионообразования при воздействии галактических космических лучей, концентрации различных ионов и электронов рассчитывались в диапазоне широт 60° S -64° S, 64.7° N -67.3° N и долгот 0° and 360° E. В расчетах использовалось распределения температуры и плотности тропосферы по данным радиозатменных экспериментов со спутника Mars Global Surveyor в период низкой солнечной активности. Показано постоянное присутствие зависящего от долготы высотного максимума электронной концентрации в ночной ионосфере Марса на уровне слоя D. Мода 2 полусуточного прилива преобладает в летнее время, а мода 3 – в зимнее. Кластеры воды $H_3O^+(H_2O)_n$, $NO_2^-(H_2O)_n$ и $CO_3^-(H_2O)_n$ определяют ионный состав слоя D марсианской ионосферы.



Рис. 2. Высотные профили основных положительных (справа), отрицательных (слева) ионов и электронов в атмосфере Марса в летнее (64.7N, 205E, вверху) и зимнее (64S, 208E, внизу) время. Haider, S. A., M. A. Abdu, I. S. Batista, J. H. A. Sobral, V. Sheel, G. J. Molina-Cuberos, W. C. Maguire, and M. I. Verigin, (2009), Zonal wave structures in the nighttime tropospheric density and temperature and in the D region ionosphere over Mars: Modeling and observations, J. Geophys. Res., 114, A12315, doi:10.1029/2009JA014231.

4.2.2. Сопоставление влияния рентгеновской вспышки и корональной инжекции массы на электронную концентрацию слоя Е земной и марсианской ионосфер (ИКИ)

По данным спутника Mars Global Surveyor, полученным в период с 12 по 18 мая 2005 г. исследовано влияние рентгеновской вспышки и корональной инжекции массы на интегральную электронную концентрацию (TEC) слоя Е марсианской ионосферы во время сильных солнечных событий 13 мая. Во время вспышки моделирование TEC слоя Е марсианской ионосферы проводилось с использованием измеренного потока рентгеновского излучения. Показано, что солнечная вспышка привела к росту интегральной электронной концентрации слоя Е в 6-10 раз. Отклик на это событие наблюдался также в плазменной частоте спорадического слоя Е земной ионосферы приблизительно в то же время, что и по наблюдениям на MGS.

Haider, S. A., M. A. Abdu, I. S. Batista, J. H. Sobral, Esa Kallio, W. C. Maguire, and M. I. Verigin (2009), On the responses to solar X-ray flare and coronal mass ejection in the ionospheres of Mars and Earth, Geophys. Res. Letters, 36, L13104, doi:10.1029/2009GL038694.

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

Исследованы слоистые структуры ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания. Проведено теоретическое обоснование и разработана методика анализа данных радиопросвечивания, обеспечившая увеличение чувствительности радиозатменных данных к слоистым образованиям в ионосфере Венеры. Применение новой методики позволило изучить тонкую структуру ионосферы в интервале высот от нижней границы до ионопаузы. Корреляция энергетических и неэнергетических параметров когерентных радиоволн диапазонов 32 и 8 см и разработанные критерии оценки эффектов с высокой достоверностью разделяют влияние плазмы, нейтральной атмосферы и шума на вариации фазы, частоты и интенсивности зондирующих сигналов, что обеспечивает высокую точность определения физических характеристик ионосферы Венеры.



Рефракционное ослабление. вычисленное ИЗ частоты сигнала (синяя кривая), совпалает с вариациями мощности сигнала диапазона 32 СМ (красная кривая), обусловленными влиянием только ионосферной плазмы. Ha границах плазменных слоев резко увеличивается градиент электронной концентрации, что приводит к фокусировке радиоволны и увеличению ee мошности. Наличие многочисленных границ свидетельствует слоистой структуре ионосферы Венеры.

По результатам обработки данных спутников "Венера-15,-16" с применением новых технологий установлено регулярное существование плазменных слоев в нижней области дневной ионосферы Венеры на высотах 80...120 км. Возможность детектирования слоев с малой концентрацией плазмы обеспечена теоретическим обоснованием линейной связи вариаций энергетических и неэнергетических параметров двух когерентных радиоволн и прецизионным определением их интенсивности и фазы. Обнаруженные нижние слои ионосферной плазмы (ниже области максимальной ионизации) не наблюдались ни в одной миссии к Венере, их природа не объясняется существующими теоретическими моделями. Нижняя область ионосферы проявляет значительную изменчивость, ее протяженность 20...40 км, в ней могут формироваться периодические структуры с характерным вертикальным масштабом слоев 4...5 км, ее свойства зависят от освещенности Солнцем, на ночной стороне аналогичная ионизованная область не наблюдается. Максимальные градиенты электронной концентрации наблюдаются на границах областей нижнего и главного максимумов ионизации, на этих высотах фокусировка может увеличить мощность радиоволны в 4 раза. Выше области максимума ионизации дневной ионосферы на высотах 150...180 км обнаружены вариации рефракционного ослабления радиоволн, связанные с вариациями градиентов электронной концентрации и свидетельствующие о слоистой структуре верхней части ионосферы. Регулярное наблюдение слоистых структур может быть следствием проявления волновой активности в ионосфере Венеры.

1. Gavrik A.L., Pavelyev A.G., Gavrik Yu.A. Detection of ionospheric layers in the Daytime Ionosphere of Venus at Altitudes of 80-120 km from VENERA-15 and -16 Two-Frequency Radio-Occultation Results // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. V. 49. № 8. P. 1223-1225.

DOI: 10.1134/S0016793209080362. http://www.springerlink.com/content/a212563728825476/fulltext.pdf

- Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Wickert J., Gavrik A.L., Lee C.C. Eikonal acceleration technique for studying of the Earth and planetary atmospheres by radio occultation method // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. P. 1-5. doi:10.1029/2009GL040979, L21807.
- 3. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Самознаев Л.Н. Вариации амплитуд и частот когерентных радиосигналов при просвечивании дневной ионосферы Венеры // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 277-284. <u>http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAG762MEP3&lang=ru</u>
- 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 // УФН 2010. Т.180. С. 542-548.
- 5. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Копнина Т.Ф. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 5. С. 1-14. <u>http://jre.cplire.ru/jre/may10/1/text.pdf</u>
- 6. Гаврик Ю.А., Григорьевская М.В. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосферы Венеры // Нелинейный мир. 2010, №2 т.8, с.82-83.
- 7. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Т.Ф. Копнина. Локализация плазменных слоев в ионосфере Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания / "Физика плазмы в солнечной системе" ИКИ РАН. 2009. С. 60. <u>http://solarwind.cosmos.ru/txt/2009/conf2009thesis.pdf</u>
- Gavrik A.L., Gavrik Yu.A., Samoznaev L.N., Kopnina T.F. Permanent layer in the Venus lower ionosphere / International Conference on Comparative Planetology: Venus-Earth-Mars. ESTEC. Noordwijk. The Netherlands. 11-15 May. 2009. P. 165.
- Gavrik A.L., Samosnaev L.N. Study of Layered Structures in the Ionosphere of Mars by a Dual-Frequency Occultation Method / Russian-Chinese Working meeting on the joint scientific program of the Phobos-Soil and YH-1 mission. 16-18 March 2010. SRI. Moscow. Russia. P. 19-20.
- Гаврик А.Л. Исследование динамики слоистых структур ионосферы и атмосферы Венеры методом двухчастотного радиопросвечивания / Физика плазмы в Солнечной системе. ИКИ РАН. 08-12 февраля 2010. С. 32-33. <u>http://solarwind.cosmos.ru/txt/conf2010thesis.pdf</u>
- 11. Gavrik A., Gavrik Yu., Kopnina T., Samoznaev L. The structure of the Venus ionosphere from Venera-15,-16 radio occultation measurements / 38th COSPAR Scientific Assembly. Germany. Bremen. 18-25 July. 2010. Paper № C32-0040-10.
- Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Самознаев Л.Н. Результаты двухчастотного радиопросвечивания дневной ионосферы Венеры / Всероссийские радиофизические научные чтенияконференции памяти Н.А. Арманда (Всероссийская научно-практическая конференция. Космическая радиолокация). Муром. 28 июня-1 июля 2010. С. 118-122.

http://www.mivlgu.ru/conf/murom2010/html/materials/KRL2010/section3/1.pdf

- 13. Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Копнина Т.Ф., Самознаев Л.Н. Радиофизические эффекты в экспериментах двухчастотного радиопросвечивания ионосферы Венеры / Сборник тезисов. Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 15-19 ноября 2010. С. 251. <u>http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=2188</u>
- 14. Григорьевская М.В., Гаврик Ю.А. Слоистые структуры в ионосфере Венеры по данным экспериментов радиопросвечивания / VII Конференция молодых ученых "Фундаментальные и прикладные космические исследования" Москва. ИКИ РАН. 2010. С.21. <u>http://arc.iki.rssi.ru/conf/stud2010/progr2010.pdf</u>
- 15. Григорьевская М.В., Гаврик Ю.А. Слоистые структуры в ионосфере Венеры по данным экспериментов радиопросвечивания / 1-ая конференция молодых ученых наукограда Фрязино. 2010.

5. Лабораторное моделирование плазменных процессов

5.1. Лабораторное моделирование нестационарных явлений вспышечного типа и радиовсплесков

5.1.1. Исследование динамики токовых слоев (ИОФ)

1). В рамках Программы ОФН-15 в ИОФ РАН исследуется динамика токовых слоев, которые создаются в экспериментальной установке TC-3D и формируются в различных условиях, в 3D и 2D магнитных конфигурациях. В большинстве реализованных режимов токовый слой существует в течение продолжительных интервалов времени в метастабильном состоянии. В то же время, моделирование явлений вспышечного типа подразумевает переход токового слоя на определенном этапе его эволюции к импульсной фазе магнитного пересоединения, или макроскопическому разрыву. При попытках реализовать экспериментально импульсную фазу пересоединения в рамках экспериментов на установке TC-3D возникли серьезные проблемы, которые обусловлены, во-первых, ограниченным диапазоном условий, в которых могла быть создана начальная плазма в сильных магнитных полях, и, во-вторых, трудностями реализации «жестких» режимов (значительные напряженности магнитных полей, большие токи плазмы, сравнительно малая плотность начальной плазмы).

В течение 2010 года были экспериментально определены оптимальные начальные условия развития токовых слоев, в которых с достаточно большой вероятностью происходят резкие изменений поперечных компонент магнитного поля токового слоя, что может указывать на переход от квазистационарной стадии эволюции слоя к импульсной фазе магнитного пересоединения. Существенное значение имело использование неона в качестве рабочего газа, в котором создавалась начальная плазма, а затем происходило формирование токового слоя. При токе плазмы порядка 100 кА градиент поперечного магнитного поля должен превышать 500 Гс/см, а исходное давление неона должно быть ниже, чем 20 мТорр. Продольное магнитное поле напряженностью до 3.5 кГс, направленное вдоль X линии, по-видимому, не препятствует перестройке магнитной структуры токового слоя.

Для изучения нестационарных явлений в токовых слоях была разработана и создана система многоканальных магнитных измерений, которая позволяет регистрировать пространственно-временные изменения магнитных полей в течение одного импульса работы экспериментальной установки. Это имеет принципиальное значение при изучении плохо воспроизводимых и недостаточно повторяющихся процессов, в том числе при переходе от метастабильной стадии к импульсной фазе магнитного пересоединения. Методика многоканальных магнитных измерений была апробирована на установке ТС-3D при развитии токовых слоев в сравнительно широком диапазоне начальных условий. Магнитная структура токовых слоев, которые формировались при создании начальной плазмы в аргоне, практически не изменялась в течение всего времени наблюдения, порядка 4-5 мкс. При формировании токовых слоев в

неоне наблюдались резкие изменения нормальной компоненты магнитного поля, которые возникали спонтанно и носили нерегулярный характер. В ряде случаев было зарегистрировано увеличение измеряемых значений нормальной компоненты по сравнению со спокойной стадией, что указывало на увеличение темпа магнитного пересоединения и, возможно, на переход к импульсной фазе. В ряде других случаев наблюдалось уменьшение измеряемых значений нормальной компоненты, что могло соответствовать образованию магнитного острова в пределах токового слоя.

С целью определения параметров плазмы токового слоя при его развитии на основе газа неон был впервые измерен спектр излучения плазмы токового слоя в диапазоне 600 ÷ 250 нм с помощью цифровой программируемой электронно-оптической камеры "NANOGATE 1-UF", в которой используется микроканальная пластина в качестве усилителя яркости и ПЗС матрица для записи сигналов. Определен набор спектральных линий, анализ которых позволяет исследовать изменения температур электронов и ионов, энергий потоков плазмы и других плазменных параметров в различных, пространственно разнесенных участках токового слоя, как во время метастабильной стадии эволюции слоя, так и в случае перехода к импульсной фазе магнитного пересоединения. Получены предварительные результаты измерений концентрации электронов в центральной области слоя и у его боковых краев, а также сделана оценка температуры электронов при развитии токового слоя в неоне.

2) В связи с проблемами, связанными с созданием начальной плазмы в установке TC-3D при больших напряженностях магнитных полей, были проведены сравнительные исследования развития и эволюции токовых слоев в зависимости от начальной концентрации электронов в 2D магнитных полях с нулевой линией X типа. Обычно в установке TC-3D формирование токового слоя осуществляется в предварительно подготовленной плотной плазме со степенью ионизации близкой к 50-100%, однако, в ряде случаев возникает необходимость формирования токовых слоев практически в нейтральном газе, со степенью ионизации порядка 10⁻⁴. В этом случае плотная плазма возникает за счет ионизации нейтрального газа только после возбуждении тока, приводящего к развитию токового слоя. В результате исследований, проведенных методом двух-экспозиционной голографической интерферометрии, было установлено, что начальная концентрация электронов существенно влияет на характер эволюции и на структуру токового слоя, главным образом, на ранней стадии его развития. На поздних стадиях структура и основные параметры плазменных слоев слабо зависят от начальной концентрации электронов: распределения плотности плазмы приобретают типичную форму слоя, с максимумом вблизи нулевой линии, плавным уменьшением плотности по направлению к боковым краям слоя и резким градиентом в направлении перпендикулярном к поверхности слоя. Таким образом, плоские протяженные токовые слои с плазмой, сжатой в пределы слоя, в конечном итоге формируются как при создании в магнитном поле предварительной плазмы значительной концентрации, так и в отсутствие такой плазмы, т.е. структура слоя практически не зависит от начальной плотности плазмы. Этот результат является наглядным подтверждением универсального характера развития токовых слоев в магнитных полях с нулевыми линиями Х типа.

3) При формировании токовых слоев в гелии была исследована спектральными методами эволюция во времени тангенциального ускорения и нагрева плазмы, а также концентрации электронов. Методика спектральных измерений основывалась на регистрации и анализе профилей спектральных линий водородоподобных ионов гелия: Не II 468.6 нм (переход $(n = 3) \rightarrow (n = 2)$) и Не II 320.3 нм (переход $(n = 4) \rightarrow (n = 2)$), а также атомов гелия: Не I 587.6 нм (переход $3^3D \rightarrow 2^3P$), Не I 447.1 нм (переход $4^3D \rightarrow 2^3P$) и Не I 492.2 нм (переход $4^1D \rightarrow 2^1P$). Спектральные линии Не II 468.6 нм и Не I 587.6 нм в типичных условиях экспериментов с токовыми слоями уширяются как за

счет эффекта Доплера, так и за счет эффекта Штарка, а спектральные линии Не II 320.3 нм, Не I 4471 нм и Не I 492.2 нм – в основном за счет эффекта Штарка. Различие в константах доплеровского и штарковского уширения указанных линий позволило измерить величины тепловых и направленных скоростей ионов и атомов гелия, а также плотность плазмы в различных областях токового слоя.



Для определения скоростей направленных движений плазмы на фоне тепловых скоростей, спектральные измерения проводились одновременно в ДВVХ взаимно перпендикулярных направлениях по отношению токовому К слою. с использованием камеры "NANOGATE 1-UF", рис.1. Для измерения температуры ионов и атомов, а также плотности плазмы R

центральной части токового слоя излучение регистрировалось из квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока в слое (ось *z*). Для изучения Рис.1 направленных лвижений

направленных плазмы движений излучение

регистрировалось вдоль ширины, или большего поперечного размера слоя (ось *x*).

Исследованы зависимости температуры ионов, энергий потоков плазмы и концентрации электронов от градиента поперечного магнитного поля, амплитудного значения тока плазмы и начального давления гелия. Максимальные значения концентрации электронов в центральной области слоя изменялись в пределах $(0.4 \div 2.4) \times 10^{16}$ см⁻³, температура ионов от 50 до 160 эВ, а температура атомов гелия во всех случаях была значительно ниже, порядка 20 эВ. Наиболее интересные результаты состоят в обнаружении направленных потоков плазмы, энергия которых в районе боковых краев слоя значительно превышала тепловую энергию плазмы. В зависимости от условий формирования слоя энергия плазменных потоков изменялась в пределах от 100 до1200 эВ.



На рис.2 представлены зависимости ОТ времени тепловых И направленных скоростей ионов гелия в токовых слоях, которые формировались как в 2D магнитных полях с нулевой линией ($B_z = 0$), так и в 3D магнитных полях с X линией, присутствии в продольной $(B_z = 2.9 \text{ k}\Gamma \text{c}).$ компоненты Температура ионов была практически одинаковой и в 2D, 3D магнитных И В полях. Энергия направленных потоков плазмы, ускоренных вдоль поверхности токового слоя, к моменту времени 4.3 мк

Рис. 2

поля

В

 $(< v_x >).$

продольного присутствии продольного поля, $B_z = 2.9 \text{ к}\Gamma c$, ускорения плазмы вдоль поверхности слоя не наблюдалось (<v_x^b>).

Излучаемые плазмой токового слоя спектральные линии атомов гелия: Не I 4471 нм и Не I 492.2 нм имеют довольно сложную структуру, поскольку наряду с дипольно разрешенными компонентами наблюдаются компоненты, соответствующие дипольно запрещенным радиационным переходам (рис.3). Появление запрещенных компонент свидетельствует о сравнительно высокой интенсивности внутриплазменных электрических полей. Были проведены специальные расчеты профилей указанных линий при различных концентрациях электронов плазмы, и путем сравнения экспериментальных и теоретических профилей были получены данные о концентрации электронов в последовательные моменты времени в различных областях токового слоя (рис.4).



Сопоставление профилей спектральных линий Не I 4471 нм и Не I 492.2 нм, с



Рис. 5

одной стороны, с профилями линии Не I 587.6 нм, с другой стороны, позволило определить температуру атомов гелия в токовом слое и направленных энергию потоков нейтральной компоненты плазмы (рис.5). Установлено, что энергии направленного движения атомов и ионов гелия вдоль поверхности токового слоя имеют близкие всей По вероятности, значения. появление ускоренных атомов гелия обусловлено процессами резонансной перезарядки быстрых ионов гелия на атомах гелия в плазме токового слоя.

- С.Г. Бугров, Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк. Структура электродинамических сил и ускорение плазмы в токовых слоях // Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2010г., С.193.
- Г.С. Воронов, Н.П. Кирий, А.Г. Франк Определение плотности плазмы токового слоя с помощью спектральных линий гелия с запрещенными компонентами // Тезисы докладов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2010г., С.248.
- 3. Н.П. Кирий, С.А. Литюшкин, А.В. Шелудякова. Экспериментальное изучение основных режимов работы цифровой программируемой электронно-оптической камеры NANOGATE-1UF – составной части спектроскопического диагностического комплекса «Токовый слой» // Тезисы XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2010г., С.210.
- 4. А.Г. Франк Метастабильная и импульсная стадии магнитного пересоединения в лабораторных токовых слоях // <u>http://solarwind.cosmos.ru</u>, тезисы доклада на 5-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» по Программе ОФН-15, Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2010 г.
- 5. Н.П. Кирий, А.Г. Франк Лабораторные эксперименты по изучению нагрева и ускорения плазмы в токовых слоях в 3D магнитных конфигурациях // <u>http://solarwind.cosmos.ru</u>, тезисы доклада на 5-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» по Программе ОФН-15, Москва, ИКИ РАН, 8-12 февраля 2010 г.
- Н.П. Кирий, С.А. Литюшкин, А.В. Шелудякова. Изучение режимов работы спектроскопического диагностического комплекса // Труды шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, февраль 2010.
- 7. Н.П. Кирий, С.А. Литюшкин, А.В. Шелудякова. Изучение режимов работы спектроскопического диагностического комплекса // Труды шестнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, февраль 2010.
- 8. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. Сверхтепловые течения плазмы в токовых слоях, сформированных в двумерных и трехмерных магнитных конфигурациях // Физика плазмы 2010, Т. 36(4), С. 387-394.
- Г.С. Воронов, Н.П. Кирий, А.Г. Франк Изучение особенностей динамики плазмы токовых слоев по характеристикам дипольно-запрещенных линий нейтрального гелия // Тезисы докладов XXIV съезда по спектроскопии, 28 февраля - 5 марта 2010 г. Т.2, С. 427-428.
- Г.В.Островская, А.Г.Франк, С.Ю.Богданов. Влияние параметров начальной плазмы на структуру токовых слоев, развивающихся в двумерных магнитных полях с нулевой линией. // Журнал Технической Физики 2010. Т. 80(7), С.24-33.
- 11. А.Г.Франк. Динамика токовых слоев как основа вспышечных явлений в замагниченной плазме // УФН 2010 Т. 180(9) С.982-988.
- 12. A.G. Frank, N.P. Kyrie, S.N. Satunin. Plasma dynamics in laboratory-produced current sheets // Abstracts for the US-Japan Symposium on Magnetic Reconnection (MR 2010), Japan, Nara, 6-9 December 2010, P.28.
- А.Г.Франк, С.Н.Сатунин. Изменения структуры токов и сил в процессе эволюции токовых слоев. Генерация токов обратного направления // Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2011г., в печати.
- 14. Г.С. Воронов, Н.П. Кирий, В.С.Марков, А.Г. Франк. Тангенциальное ускорение атомов гелия в плазме токового слоя // Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 8-12 февраля 2011г., в печати.

5.1.2. Исследование порогов генерации радиоизлучения (ИОФ)

Проведены исследования генерации электромагнитного излучения на плазменной частоте и ее гармонике при взаимодействии электронного пучка с плазмой в условиях, моделирующих взаимодействие потоков энергичных электронов с плазмой солнечной короны.

Эксперименты проводились со столбом распадающейся плазмы плазменнопучкового разрядав при давлении $10^{-4} - 10^{-3}$ Торр в продольном магнитном поле, создаваемым системой катушек. В плазму с плотностью $n_0 \sim 5 \cdot 10^{11}$ см ⁻³инжектировался пробный электронный пучок с длительностью переднего фронта 0,2 мкс, относительной плотностью $n_b/n_0 \sim 10^{-5} - 10^{-3}$ и энергией электронов $W_b = (mv_b^2)/2 = 50-5000$ ($W_b/T_e = 10-1000$). Волновое число возбуждаемых колебаний $k_0 = w_p / v_b = 10-50$ см⁻¹ (соответствующая длина волны $\lambda = 2 \pi/k_0 = 0, 1-0, 6$ см.) при длине установки $L \sim 100$ см позволило достичь длины взаимодействия L / $\lambda \sim 1000$. Начальная ширина функции распределения электронов по скоростям $\Delta v_b/v_b = 0,2$. Для выяснения роли ионов в протекающих процессах для создания плазмы в экспериментах были использованы аргон и водород, как газы с резко различающимися массами. Для создания размытого по продольным скоростям распределения электронов пучка катод находился в области с нулевым магнитным полем; начальное размытие по продольным скоростям составляло $Dv_b/v_b = (\frac{1}{2})$ $D_b/W_b \approx 0.2$.

Электромагнитное излучение имеет характер вспышек длительностью $\leq 10^{-7}$ си шириной спектра $\Delta \omega / \omega \sim 0,25$. Характерное время нарастания излучения на частоте w_p составляет ~5 $\cdot 10^{-7}$ с. Типичные спектры радиозлучения приведены на Рис.1



Рис.1. Спектр радиоизлучения

Пороги регистрации радиоизлучения на плазменной частоте в зависимости от параметров пучка и плазмы для аргона и водорода приведены на Рис.2.

$$P(\omega_p) = \frac{\sqrt{3}}{12p} \frac{W_{pe}}{n_e c^3} W_{pe} \frac{v_T}{v_f} W_L$$
 ~10⁻¹⁰ Вт/см³, где W_L – плотность энергии ленгмюровских

волн, v_f – их фазовая скорость. При рассеянии на надтепловых флуктуациях (ионнозвуковых волнах) этп величина возрастает в $(4\pi)^{-1}(\delta n_i/n_i)^2 (k/\Delta k)n_i \lambda_e^3$ раз (Stenzel, Whelan, 1981; Shukla, 1983). Для наших параметров $(\delta n_i/n_i) \le 0, 1, \Delta k/ k \sim 0, 15, \lambda_e \sim 0, 1$, $W_L/n_0 Te \approx 0, 1\approx 0, 4$ мощность излучения составляет $P(\omega) \approx 10^{-3}$ Вт/см³ при измеренной мощности 10^{-4} - 10^{-3} Вт/см³.

Порог радиоэмиссии при этом определяется порогом распадной неустойчивости

$$W_{L}/4\pi n_{e}T_{e} \sim (m_{e}/m_{i})^{1/2} (\Delta\omega/\omega) \sim (m_{e}/m_{i})^{1/2}) (T_{e}/W_{b}) (\Delta v_{b}/v_{b})$$
(1),

имеющим обратно пропорциональную зависимость от ионной массы. Приравнивая полученное значение квазилинейному уровню энергии $W_{QL} \sim (n_b/n_0)(W_b/T_e)^2$, можно получить совпадающую



Рис.2. Пороги регистрации радиоизлучения в плазме разных газов

Рис.3. Зависимость мощности радиоизлучения от параметров электронов пучка. I- ω_{p_n} II-2 ω_p

с экспериментальной пороговую зависимость $n_b/n_0 \sim (T_e/W_b)^3$. Время нарастания излучения близко к величине нескольких обратных инкрементов неустойчивости для широкого спектра ленгмюровских волн.

В слабой турбулентности в качестве механизма генерации излучения на второй гармонике обычно рассматривается слияние на звуке двух противоположно направленных ленгмюровских волн $l + l + s \rightarrow t$.

Этот процесс возможен для узкого спектра ленгмюровских волн при выполнении условия $Te=4pm_ec^2/m_i\sim 50$ в $\Delta k_L/k_L > k_0/k_L$ для широкого спектра с относительной шириной $\Delta k_L/k_L = (\Delta v_b/v_b)(ln2/2N)$. Здесь , $k_0 r_D = (1/3)(m_e/m_i)^{-1/2}$, *N*-число инкрементов пучковой неустойчивости, т.е. отношение энергии плазменных шумов к тепловой энергии Температура плазмы в эксперименте не превышает 5 эВ, относительная ширина спектра составляет $\Delta k_L/k_L \approx 10^{-2}$ в то время как $k_0/k_L = 0.1$ -0.5 для водорода и 0,02-0.1 для аргона. Таким образом, слаботурбулентные механизмы не объясняют наблюдаемые процессы. В качестве сильнотурбулентного механизма генерации второй гармоники рассматривается когерентное излучение из коллапсирующих ленгмюровских каверн, дающее коэффициент преобразования энергии ленгмюровских волн в энергию радиоизлучения $W_t/W_l = 20(m_t/m_e)^{1/2} (T_e/(m_ec^2)^{3/2} \sim 10^{-4}$.

Развитие коллапса замедляет релаксацию пучка и рост мощности радиоизлучения.



Рис.4. Зависимость пороговой энергии перехода к сильной турбулентности от энергии электронов пучка

Вычисленная по формулам квазилинейной теории энергия ленгмюровских волн $W_L/n_0Te \sim 1$, близка к значениям, определяемым из скорости нагрева плазмы при воздействии пучка $dT_e/dt = 2$

 $= ve^2 E^2/m\omega^2$, но в несколько раз превышает теоретические пороги нелинейных процессов, что демонстрирует приведенная на Рис.4 пороговая зависимость $W_L/n_0T_e \sim krD^2$.

Выводы. Проведены исследования генерации электромагнитного излучения на плазменной частоте и ее гармонике при взаимодействии размытого по скоростям ($\Delta v_b/v_b = 0,2.$) электронного пучка с плазмой. Установлено, что отношение мощностей излучения на основной частоте и гармонике составляет 30-40 дБ.

В качестве основного механизма излучения электромагнитных волн на плазменной частоте рассматривается рассеяние плазменных волн на нетепловых флуктуациях ионов плазмы, возбуждаемых при развитии распадной неустойчивости ленгмюровских волн.

Излучение на второй гармонике плазменной частоты объясняется когерентным излучением из ленгмюровских каверн, формирующихся в пучностях стоячих ленгмюровских волн.

 $D.M.\ Karfidov.\ Radio emission\ under\ primary\ broad\ electron\ beam\ relaxation\ in\ a\ plasma\ //\ Physics\ Letters\ A\ (to\ be\ published)$

5.2. Моделирование динамики волн в магнитосфере и ионосфере

5.2.1. Исследовался вопрос о происхождении интенсивных продольных токов в низкоширотном пограничном слое магнитосферы по взаимодействию магнитного диполя с лазерной плазмой на полюсах лабораторной Терреллы. (ИЛФ СО РАН)

1) Формулировка проблемы и постановка эксперимента



Рисунок 1. Схема магнитосферного генератора

На рис.1 схематично изображен магнитосферный генератор движущий продольные токи зоны-1 в Северном полушарии. Используется система координат GSM и соответствующая сферическая система с азимутальным углом, отсчитываемым против часовой стрелки от оси Х. Жирными линиями нарисованы две токовые цепи - в терминаторной плоскости (серая) и топологически аналогичная на дневной стороне (черная). Обе цепи замыкаются через ионосферу. Геометрия возвратного тока за пределами магнитосферы неизвестна и часть его может течь через высокоширотный касп. На обоих флангах низко-широтного пограничного слоя плазма движется вдоль границы магнитосферы поперек магнитного поля и со сдвигом вдоль него. Такое движение создает электрическое поле и азимутальную компоненту магнитного поля δ BFAC так, что вектор Пойтинга-Умова Sp направлен вверх, как изображено на рисунке слева. Следующие друг за другом стрелки

показывают, что для угла ϕ отсчитываемого против часовой стрелки азимутальное поле

Вφ создаваемое тангенциальным смещением и сдвигом является положительным на утренней стороне и отрицательным на вечерней. Следует обратить внимание на то, что

токи, ассоциированные с таким полем В ϕ должны течь вверх на внутренней границе пограничного слоя в утреннем секторе и вниз в вечернем секторе. Следующие друг за другом стрелки изображенные в меридиональном сечении качественно отмечают магнитное возмущение, которое образуется от цепей продольных токов внутри магнитосферы – направленное к Солнцу над Северным полюсом и противоположно дипольному полю на экваторе.

В соответствии с рис. 1 цель настоящей работы состояла в измерении азимутального магнитного поля в его связи с ПТ. Эксперименты проводились на стенде моделирования космических явлений КИ-1. Стенд включает вакуумную камеру длиной 5 и диаметром 1.2 м с рабочим давлением 10-6 Торр. Два СО2 лазерных луча длительностью импульса 70 нс и энергией 150 Дж каждый фокусировались и совмещались в пятно диаметром 1 см на поверхности твердой мишени из перлона (C6H11ON). Лазерная плазма состояла в основном из ионов H+ и C4+ в примерно равных частях и инерциально расширялась в телесном угле ≈1 рад со средней скоростью V₀≈1.5·107 см/с. Полная кинетическая энергия и число ионов в потоке плазмы были ≈40 Дж и ≈5·10¹⁷ соответственно. На оси разлета плазмы на расстоянии 60 см располагался магнитный диполь. Магнитный момент имел значение $\mu = 1.15 \cdot 106 \, \Gamma c \cdot cm3$; время спадания ~10-3 с при типичном времени взаимодействия ~10-5 с. Момент был всегда ориентирован перпендикулярно оси взаимодействия Х, либо на Юг, либо на Север. Диполь имел сферическую оболочку из нержавеющей стали радиусом 8 см. Ко времени t=2 µс после лазерного облучения мишени плазма достигала области взаимодействия и на расстоянии примерно R_m≈15 см от центра диполя формировалась четко выраженная магнитопауза.

Благодаря специфичной моде лазерного генератора пик-хвост за основным потоком лазерной плазмы следовал вторичный скачок плотности и давления. Второй поток слегка сжимал магнитосферу и вызывал генерацию значительных продольных токов. Такие условия схожи со скачками давления в Солнечном Ветре. Кинетическое давление лазерной плазмы, измеренное электрическим зондом, представлено ниже. Как показано на рис. 2 и описано в деталях в работе (Shaikhislamov *et al* 2009) в условиях данных экспериментов над полюсами развивается интенсивная система ПТ. Локальная плотность продольных токов была получена прямыми измерениями поясом Роговского, а интегральная величина с помощью двойных пластин. Судя по измеренной полной величине ПТ (лишь в $2 \div 4$ раза меньше полного тока Чепмена-Ферраро на магнитопаузе) и высокой проводимости металлической оболочки моделирующей ионосферу продольные токи достигали состояния насыщения. Как указано во введении, описано в (Shaikhislamov *et al* 2009) и будет показано в настоящей работе, магнитные возмущения над полюсами и в экваториальной области на дневной стороне хорошо соответствуют ПТ зоны-1. В
лабораторных экспериментах овал высыпающих частиц достаточно широк (в пределах θ

=40÷70₀ широты) и охватывает большую часть дневного сектора полюса. Такие низкие широты расположения овала являются вероятно результатом относительно большого размера диполя по сравнению с размером магнитосферы. Следует отметить, что такая ситуация типична для Меркурия, влияние ПТ на структуру и динамику магнитосферы которого сформулирована как одна из основных задач исследования этой планеты (Baumjohann *et al* 2006). Каналы продольных токов втекающих и вытекающих из металлической оболочки расположены в пределах овала высыпающих частиц и характеризуются интенсивным и специфическим свечением, вызванным протеканием тока. Области ПТ на полюсах проектируются на магнитослой и примыкающую к нему внутреннюю магнитосферу.



Рисунок 2. Схема эксперимента. 1 – лазерная плазма; 2 – низкоширотный магнитный зонд; 3 – полярный магнитный зонд. Также схематично показаны силовые линии магнитного поля (черные линии), линии течения плазмы (двойные линии), пограничные слои и овалы высыпания плазмы (заштрихованные области), продольные токи (белые стрелки) и области специфического свечения на поверхности диполя вызванные продольными токами.

Ранее также было обнаружено, что диэлектрическая пленка покрывающая диполь подавляет ПТ. Это позволило вычленить вклад ПТ в магнитосферное поле. В отличие от спутниковых измерений, магнитные зонды в лаборатории регистрируют изменение поля в ходе формирования магнитосферы и всех остальных процессов. Сжатие магнитосферы и токи Чепмена-Ферраро создают магнитное возмущение, направленное к солнцу над Северным полюсом (также как и возмущение от ПТ) и усиливает поле диполя на экваторе (противоположно вкладу от ПТ). Поскольку у экспериментальной магнитосферы хвост не успевает образоваться, за пределами меридиональной и экваториальной плоскостей магнитный зонд зарегистрирует все компоненты поля, включая азимутальную. Эта часть азимутальной компоненты В**Ф**, вызванная токами на магнитопаузе имеет такую же симметрию, как и поле генерируемое тангенциальным сдвиговым течением плазмы в

пограничном слое. Однако, искомое В**Ф** связанное с продольными токами должно иметь существенно другую пространственную структуру и временную динамику. Сравнение случаев диэлектрической и проводящей оболочки диполя позволит вычленить азимутальное возмущение поля В**Ф** порожденное ПТ, что и является целью настоящей работы.

С этой целью низкоширотный зонд (H3) располагался над экватором (Z=4 см) в стороне от меридиональной плоскости в вечерней секторе с азимутальным углом примерно равным $\phi \approx 15 \div 200$. Начиная с положения глубоко внутри магнитосферы, зонд мог пересекать пограничный слой и далее в поток невозмущенной плазмы по радиусу с примерно неизменным азимутальным углом. Зонд также можно было переместить через меридиональную плоскость в утренний сектор и сделать аналогичное пересечение магнитослоя. Другой способ измерений на утренней стороне заключался в обращении магнитного момента диполя с Юга на Север и инвертировании всех магнитных сигналов. Полный продольный ток текущий над полюсами и далее через проводящую оболочку измерялся аналогично работе (Shaikhislamov *et al* 2009). Две тонкие медные пластины накладывались на полюса диполя. Они изолировались от собственной оболочки диполя и были разделены между собой в направлении оси взаимодействия. Шунт между ними скомбинированный с поясом Роговского позволял измерить полный ток, протекающий между пластинами.

2). Результаты экспериментов

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы НШ зонда внутри магнитосферы (вторая панель) и за пределами магнитосферы (четвертая панель). На каждой панели даны все три компоненты магнитного возмущения. Можно видеть, что δ Br компонента везде положительна, поскольку при сжатии дипольного поля силовые линии вблизи экватора становятся более прямыми. Основная δ B θ компонента меняет знак так как дипольное поле усиливается внутри магнитосферы и полностью вытесняется вне ее. Присутствует также азимутальная компонента. Следует обратить внимание на то, что она имеет такой же знак, как и на рис. 1 на вечерней стороне и что на средней панели она примерно в три раза больше чем на других. Другая заметная черта всех сигналов - наличие двух максимумов в примерно 3 и 6 µс. Второй максимум вызван скачком давления в лазерной плазме, как это видно из первой панели, где представлено кинетическое давление плазмы.

На рис. 4 на двух панелях показаны три компоненты магнитных возмущений на утренней стороне ($\phi \approx -200$) и на вечерней ($\phi \approx +170$) примерно на одном расстоянии от центра

диполя R = 16 см. Компоненты δBr и $\delta B\theta$ имеют одинаковый знак на обеих панелях и,

исключая некоторый разброс в повторяемости, близки друг к другу. В отличие от этого, азимутальная компонента обнаруживает очевидное обращение знака. Такие же измерения с моментом диполя инвертированным в обратную сторону на Север дают аналогичную картину но с инверсией всех компонент. Таким образом, азимутальная компонента имеет квадрупольную структуру и обращает знак при пересечении и меридиональной и экваториальной плоскости.



Рисунок 3. Осциллограммы сигналов трех компонент НШ магнитного зонда в трех пространственных точках в вечернем секторе для проводящей поверхности диполя. Сплошная линия - $\delta B \phi$, штриховая - $\delta B r$, точечная - $\delta B \theta$. На верхней панели представлено кинетическое давление плазмы вычисленное по измерениям электрического зонда на расстоянии R=10 ст в отсутствии дипольного поля.



Рисунок 4. Осциллограммы сигналов трех компонент НШ магнитного зонда измеренные по разные стороны от меридиональной плоскости. Сплошная линия - δВφ , штриховая - δBr , точечная - δBθ .

Суть различий между диэлектрической и проводящей поверхностью диполя хорошо демонстрируют профили сигналов, построенные из измерений на различных расстояниях.

Эти профили на вечерней стороне даны на рис. 5 для ряда последовательных времен. Из распределений компоненты $\delta B\theta$ (верхняя панель) можно видеть, как плазма формирует магнитосферу и как второй скачок давления слегка смещает магнитопаузу к диполю. Толщина переходного слоя (от максимума до минимума возмущения) составляет примерно 3÷4 см. Сжатие поля внутри магнитосферы существенно меньше для случая проводящей поверхности диполя. Второй скачок давления приводит к тому, что поле

становится даже ниже уровня начального дипольного. Этот понижение интерпретируется как эффект ПТ зоны-1, обсуждавшийся выше. Азимутальная компонента δ Вφ представлена на нижних панелях. Для диэлектрического случая она показывает осцилляции с общим увеличением в сторону диполя. В проводящем случае наблюдается гораздо более выраженная структура – компактный минимум внутри магнитосфер и в непосредственной близости от переходного слоя. Этот минимум формируется исключительно вторым скачком давления.



Рисунок 5. Пространственные профили компонент δВθ и δВφ на вечерней стороне в последовательные моменты времени для случаев диэлектрической и проводящей поверхности диполя.

Этот эффект более детально можно видеть непосредственно сравнивая осциллограммы сигналов для случаев проводящей и диэлектрической поверхности диполя. Из рис. 6 следует, что $\delta B \phi$ примерно такое же в пределах пограничного слоя, заметно больше по амплитуде на внутренней границе пограничного слоя для случая проводящего диполя и меньше внутри магнитосферы. Примерно такие же тенденции представленные на рис. 5 и 6 наблюдались на утренней стороне магнитосферы.

Полярный зонд находился ближе к каналам продольных токов и зарегистрировал более выраженную разницу между случаями проводящей и диэлектрической поверхностью. На рис. 7 показана магнитная компонента в Солнечном направлении δВх. Она в два-три раза больше, когда присутствуют ПТ и длится гораздо дольше. Компонента δВу тоже была значительно больше в случае проводящей поверхности, а компонента бВz меняла знак. В диэлектрическом случае возмущение δBz формируется диамагнитным эффектом плазмы текущей вдоль силовых линий на полюса диполя и направлено противоположно дипольному полю. В случае проводящей поверхности та часть канала продольных токов, которая простирается от полюса к дневной магнитопаузе генерирует отрицательное δBz, т.е. в направлении дипольного поля. В первом приближении вклад ПТ в магнитосферное поле можно определить, вычитая магнитные измерения в диэлектрическом случае от случая проводящей поверхности диполя. На рис. 8 показана такая разность для всех компонент полярного зонда. Левая панель соответствует сигналам над Северным полюсом, правая – над Южным, полученные инвертированием момента диполя.



Рисунок 6. Осциллограммы компоненты δВφ в трех точках в вечернем секторе для случаев диэлектрической (точечная кривая) и проводящей (сплошная кривая) поверхности диполя.

Также представлен следующий ключевой экспериментальный факт – полная величина ПТ измеренная между утренней и вечерней пластинами, как это описано в предыдущем разделе. Инверсия дипольного момента вызывала практически точное обращение сигнала ПТ. Как это видно из рис. 8, ПТ начинаются примерно с приходом плазмы на полюса, но действительно большую величину в 2 кА достигают от воздействия второго скачка давления.



Рисунок 7. Осциллограммы компоненты δВх над Северным полюсом для случаев диэлектрической (штриховая кривая) и проводящей (сплошная кривая) поверхности диполя.



Рисунок 8. Полный ток измеренный между утренней и вечерней пластинами (зашумленная линия) на Северном полюсе (левая панель) и при инвертировании дипольного момента (справа). Также показаны разностные сигнал полярного магнитного зонда. Сплошная - ΔBy , штриховая - ΔBz , точечная - ΔBx .

При инвертировании дипольного момента магнитные возмущения над полюсами также обращались, хотя и не абсолютно подобным образом, что связано с не полной симметричностью экспериментальных условий. Направление вектора магнитных возмущений соответствует стрелкам над полюсом на рис. 1.

3). Выводы

Полагая, что Северная и Южная петля продольных токов имеют размер 10 см и полный ток 2 кА в каждой, магнитное возмущение от них в экваториальной плоскости можно оценить как 150÷200 Гс. Это близко к величине понижения поля, или разнице в величине компоненты δВӨ внутри магнитосферы между диэлектрическим и проводящим случаями

(рис. 5, верхняя панель). Увеличение на 100÷150 Гс компоненты δВх в Солнечном направлении над полюсом диполя, вызванное ПТ (рис. 8) также с точностью до двойки количественно согласуется с измеренной полной величиной транс-полярного тока между пластинами. Пространственная структура азимутальной компоненты (рис. 5, нижняя текущего панель) предполагает наличие тока, вниз на внутренней границе низкоширотного пограничного слоя (для вечернего сектора, и вверх для утреннего). Интегральную величину этого тока можно оценит как

$$I_{\text{HIII}} \approx c \frac{\Lambda B_{\phi}}{4\pi} \cdot \pi \frac{R}{2} \approx 1.5 \div 2.5 \text{ KA}$$

где ΔВф есть максимальная величина (100÷150 Гс), πR 2 - длина дневной полу-дуги,

вдоль которой распределены токи, R \approx 13 cm. Полученная оценка близка к полной величине ПТ, измеренной между пластинами на полюсах диполя. Таким образом, эксперимент дал три факта. Азимутальная компонента поля связанная с ожидаемым сдвиговым стрессом магнитного поля в низкоширотном пограничном слое действительно существует. Продольные токи, связанные с азимутальной компонентой количественно согласуются с независимо измеренным интегральным ПТ. Третье, когда ионосфера непроводящая азимутальная компонента отличается и не имеет четко выраженного локального максимума. Это позволяет сделать предположение о том, что когда ПТ не могут замкнуться через полюса диполя магнитные силовые линии перемещаются плазмой как целое без сдвигового стресса, в то время как для проводящей ионосферы ток не выравнивает стресс, а течет по пути наименьшего сопротивления. Динамически специфическое увеличение азимутальной компоненты происходит раньше примерно на 1 $\div 2$ µс, чем ПТ на полюсах достигает своего максимума. Разница между причиной и

следствием ожидаема и более или менее соответствует времени необходимому Альфвеновской волне, чтобы пройти от экватора к полюсам.

Полученные данные дают первое экспериментальное свидетельство о расположении генератора ПТ зоны-1 вблизи низкоширотного пограничного слоя. Данные подтверждают результат численных исследований (Keller *et al* 2002) о том, что область генерации ПТ находится внутри магнитосферы, примыкая к внутренней границе пограничного слоя. Изза специфики лабораторного эксперимента головная ударная волна в настоящих опытах отсутствует и тепловое давление невелико. Это исключает механизмы генерации ПТ, основанные на градиенте давления. Корреляционный анализ магнитных сигналов показал, что максимум азимутальной компоненты движется синхронно с током магнитопаузы. Это указывает на то, что компрессионные волны возбуждают Алфвеновские, которые в свою очередь переносят продольные токи на полюса. Такая модель, нацеленная на объяснение транзиентных геомагнитных возмущений, была предложена в работе (Glassmeier and Heppner 1992).

Как было указано ранее, полный продольный ток на оба полюса (≈4 кА) сравним с полным током Чепмена-Ферраро (≈9 кА). В будущем планируется выяснить находиться ли ПТ в состоянии насыщения и измерить его вольт-амперную характеристику посредством изменения сопротивления между утренней и вечерней пластинами, моделирующими ионосферу. Представляет интерес определить, влияют ли насыщенный ПТ на движение плазмы в низкоширотном пограничном слое. Настоящий эксперимент имеет ограничения, которые в будущем планируется избежать. Например, азимутальная компонента была измерена только вблизи меридионального сечения, хотя она может простираться вплоть до плоскости терминатора. Лазерная плазма импульсная. Квазистационарная плазма тета-пинча, создающая магнитосферу и лазерная плазма, генерирующая скачок давления представляется более подходящим сценарием. Такой эксперимент нацелен на моделирование экстремального сжатия магнитосферы Земли энергичной плазмой супер-мощного КВМ (Ponomarenko et al 2007, 2008, Zakharov et al 2008). Заметим, что КВМ часто вызывают большие и насыщенные значения трансполярного потенциала, как это наблюдается спутниками (Borovsky and Denton 2006). В численном моделировании воздействия КВМ на магнитосферу Земли (например, Ridley et al 2006) сильный оклик в токах зоны-1 также является одной из наиболее заметных черт. Лабораторный эксперимент может дать независимые данные и новый взгляд на физику этого явления.

I F Shaikhislamov, V M Antonov, Yu P Zakharov, E L Boyarintsev, A V Melekhov, V G Posukh and A G Ponomarenko. «Laboratory simulation of field aligned currents in an experiment on laser-produced plasma interacting with a magnetic dipole» Plasma Phys. Control. Fusion **51** (2009) 105005, doi:10.1088/0741-3335/51/10/105005

В.М. Антонов, Э.Л. Бояринцев, Ю.П. Захаров, А.В. Мелехов, В.Г. Посух, А.Г. Пономаренко, И.Ф. Шайхисламов. "Влияние проводимости поверхности на формирование магнитосферы в экспериментах по обтеканию магнитного диполя лазерной плазмой". *Прикладная механика и техническая физика*, 51(5), pp. 25-34, 2010

5.2.2. Параметрическая генерация низкочастотных волн электронами плазмы, ускоренными в условиях электронно-циклотронного резонанса (ИПФ)

В рамках продолжения программы лабораторного моделирования низкочастотных волновых процессов в плазме, окружающей антенны мощных бортовых передатчиков космических аппаратов (КА) было экспериментально изучено возбуждение НЧ волн при нагреве плазмы модулированной ВЧ накачкой, подводимой к излучающей антенне в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). При этом в плазме формируется область, заполненная ускоренными по поперечной энергии электронами, в которой наводится добавочный магнитный момент, изменяющийся с периодом модуляции сигнала накачки, - диамагнитный эффект. В результате, возмущенная область плазмы может выступать в роли «бестелесной» антенны, излучающей волны в окружающую плазму на частоте модуляции.

Параметры экспериментов, проведенных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», выбраны соответствующими, по критериям масштабного моделирования, физическим условиям в верхней ионосфере.





Рис. 7 (а) Радиальное распределение амплитуды НЧ волн свистового диапазона, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом в условиях ЭЦР ($f = 66,5M\Gamma q = f_{ce}, P = 300$ Bm) при различных частотах модуляции f_{mb} и регистрируемых на расстоянии z = 48 см от антенны. (b) Радиальное распределение амплитуды пробных НЧ волн, возбуждаемых при непосредственной подаче НЧ сигнала на рамочную антенну; измерения выполнены на тех же частотах $F = f_m$ в том же сечении z

Рис. 8 (а) Амплитуда НЧ волн свистового диапазона на частотах $F = f_m$, возбуждаемых амплитудномодулированным ВЧ сигналом ($f = 66,5M\Gamma \mu$, P = 300Вт), в зависимости от отношения f/f_{ce} ; измерения выполнены на расстоянии z = 64 см от антенны вблизи оси плазменного столба r = 0 см. (b) Амплитуда НЧ волн свистового диапазона на частоте $F = f_m = 200 \ \kappa \Gamma \mu$, возбуждаемых амплитудно-модулированным ВЧ сигналом, в зависимости от отношения f/f_{ce} в сечении z = 64 см при различных радиальных позициях r измерительного зонда

Эксперименты показывают, что при амплитудной модуляции ВЧ сигнала, подводимого к антенне, в плазме возбуждаются НЧ электромагнитные поля на частоте модуляции. Поперечные размеры области, занятой НЧ полями, которые регистрируются практически по всему сечению плазменного столба (Рис. 8(а)), существенно превосходят диаметр силовой трубки, содержащей ускоренные электроны, формирующих "бестелесную" антенну. Характерные значения амплитуды НЧ магнитных полей на периферии плазмы приблизительно на 2 порядка ниже, чем в области исходного диамагнитного возмущения вблизи антенны, и составляют $|\Delta B| \sim 10^{-4}$ Гс. Измерения позволяют однозначно идентифицировать НЧ поля как косые волны свистового диапазона, продольная фазовая скорость которых значительно превышает поперечную фазовую скорость. Наблюдается возбуждение волн конической рефракции волновой

вектор которых практически перпендикулярен к внешнему магнитному полю, а групповая скорость направлена вдоль магнитного поля. Преимущественное возбуждение волн данного типа обусловлено геометрией сформированной ускоренными электронами "бестелесной" антенны, которая сильно вытянута вдоль внешнего магнитного поля (что соответствует низким продольным волновым числам k_{\Box}), но имеет малый поперечный размер (что соответствует высоким поперечным волновым числам k_{\perp}). Поперечная фазовая скорость НЧ волн пропорциональна их частоте в соответствии с законом дисперсии волн конической рефракции ($v_{\perp} \cong c \cdot f_m/f_{pe}$).

Ускорение электронов амплитудно-модулированным ВЧ полем в условиях ЭЦР позволяет возбудить НЧ волны в большей области плазмы, чем при их излучении рамочной антенной. На Рис. 8(b) приводится радиальное распределение амплитуды пробных НЧ волн, возбуждаемых при непосредственной подаче НЧ сигнала на ту же антенну. В этом случае НЧ волны локализованы вблизи оси плазменного столба на масштабе, обусловленном размерами излучателя, и не достигают периферии плазмы, как при возбуждаемых при ускорении электронов амплитудно-модулированным ВЧ полем. Амплитуда НЧ волн, возбуждаемых при ускорении электронов амплитудно-модулированным ВЧ сигналом, резонансным образом зависит от отношения несущей частоты f к электронной циклотронной частоте f_{ce} (Рис. 9). Ширина резонанса увеличивается с повышением частоты модуляции (Рис. 9(а)), что обусловлено увеличением полной ширины частотного спектра ВЧ поля, ускоряющего электроны.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают возможность возбуждения низкочастотных свистовых волн при модулированном ЭЦР нагреве околоземной плазмы с большей эффективностью, чем при их прямом возбуждении с помощью компактных бортовых антенн КА. Оцениваемая амплитуда переменного магнитного поля в ОНЧ свистовых волнах, которые могут быть получены в активных экспериментах в верхней ионосфере с использованием описанной методики, достигает $|\Delta B_{sp}| \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ Гс (0.1 ÷ 1 нТл).

- Гущин М. Е., Коробков С.В., Костров А.В., Одзерихо Д.А., Привер С.Э., Стриковский А.В. Параметрическая генерация низкочастотных волн электронами плазмы, ускоренными в условиях электронно-циклотронного резонанса. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т.92, №2. С.89-94.
- Гущин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Одзерихо Д.А., Стриковский А.В. Циклотронное ускорение электронов в замагниченной плазме, окружающей низкочастотные антенные системы, и генерация свистовых волн. // Тезисы докладов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», г. Москва, 8-12 февраля 2010 г., с.88
- Gushchin M., Korobkov S., Kostrov A., Odzerikho D., Strikovsky A. Cyclotron heating of electrons by antennas in a weakly magnetized plasma and parametric generation of low frequency waves. // Abstracts of 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, July 18-25, 2010, C52-0014-10.
- Kostrov A.V., Gushchin M., Korobkov S.V., Odzerikho D.A., Strikovsky A.V. Parametric generation of low frequency waves by electrons accelerated in ECR regime. // Abstracts of European Planetary Science Congress, Rome, Italy, September 19-24, 2010, abstract EPSC2010-158.

5.2.3. Лабораторное моделирование динамики магнитосферных мазеров (ИПФ)

Продолжено экспериментальное исследование вспышечных процессов генерации электромагнитных волн в плазменном циклотронном мазере, активной средой которого является двухкомпонентная неравновесная плазма ЭЦР разряда, создаваемая и поддерживаемая мощным излучением гиротрона в зеркальной магнитной ловушке. В условиях эксперимента реализуется плазма с двумя популяциями электронов – холодная плотная (N_e ~ 10^{13} см⁻³, T_e ~ 300 эВ) с изотропной функцией распределения по скоростям, и горячая, существенно менее плотная (N_e ~ 10^{10} см⁻³, T_e ~ 10 кэВ) с сильно неравновесным распределением.

В распадающейся плазме примерно через 900 мкс после выключения СВЧ накачки были зарегистрированы квазипериодические всплески импульсных высыпаний энергичных электронов синхронно с импульсами СВЧ излучения плазмы в направлении перпендикулярном магнитному полю ловушки. В текущем году проведены детальные

измерения частоты электромагнитного излучения, генерируемого в плазменном циклотронном мазере в распадающейся плазме. Для параллельного спектрального анализа весь частотный диапазон приемников от 9 до 47 ГГц был разделен на 6 каналов с помощью специально изготовленных полосовых СВЧ фильтров. В ходе эксперимента было выяснено, что излучение генерируется в канале 18-25 ГГц при магнитном поле в центре ловушки 0,51 Тл, что соответствует гирочастоте электронов в центре ловушки 14,5 ГГц. Как следует из разработанной ранее участниками проекта самосогласованной модели циклотронного мазера, частота излучения определяется гирочастотой электронов, взаимодействующих с электромагнитной волной. Данные эксперимента свидетельствуют о том, что в плазме формируется распределение энергичных электронов с максимумом вблизи питч-угла, соответствующего резонансному нагреву на частоте гиротрона 37.5 ГГц. При этом взаимодействие волны с горячими электронами наиболее эффективно происходит вблизи зоны ЭЦР нагрева, поэтому частота генерируемого излучения может существенно превышать гирочастоту электронов в центре ловушки. В ходе эксперимента установлено, что частота генерируемых волн зависит от магнитного поля ловушки. Так при увеличении магнитного поля до 0.63 Тл (гирочастота электронов в центре 17,5 ГГц) излучение появляется в канале 26-35 ГГц, а в канале 18-25 ГГц пропадает. Данное обстоятельство полностью укладывается в рамки модели плазменного циклотронного мазера, а именно - частота излучения определяется гирочастотой электронов, взаимодействующих с электромагнитной волной.

Впервые проведены измерения абсолютных значений энергии, выносимой из ловушки в результате циклотронной неустойчивости разреженной плазмы. Измеренное детектором абсолютное значение мощности электромагнитных волн, генерируемых в плазменном циклотронном мазере, составляет примерно 2 мВт. Пересчет данной величины в полный телесный угол 4π соответствует полной мощности мазера в 6 кВт. Энергия, выделяемая за характерное время одной вспышки 1 мкс, составляет 6 мДж. Впервые с помощью диамагнитного зонда измерено изменение энергосодержания плазмы в течение одной вспышки неустойчивости, которое составило $2*10^{13}$ эВ см⁻³. Пересчет данной величины на весь объем плазмы (1000 см³) дает оценку энерговыделения из всего объема ловушки 3 мДж. Таким образом, всего в результате неустойчивости из ловушки выносится энергия 9 мДж, что составляет по порядку величины 10% от запасенной энергии в горячей компоненте. Треть энергии выносится горячими электронами, две трети – идет на генерацию волн. Таким образом, впервые экспериментально измерен коэффициент преобразования энергии электронов в энергию электромагнитного излучения - кпд плазменного циклотронного мазера.

Водопьянов А.В., Голубев С.В., Демехов А.Г., Мансфельд Д.А., Пасманик Д.Л. Исследование пространственной структуры электронных высыпаний при циклотронной неустойчивости плазмы ЭЦР разряда // Физика плазмы. 2010 (направлено в печать).

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

6.1. Многомасштабные каскадные процессы в физике Солнца и солнечного ветра

6.1.1. Волновые процессы и тепловые потоки в атмосфере Солнца (ИЗМИРАН)

В рамках анизотропной магнитной гидродинамики с тепловыми потоками установлена асимметрия волновых мод по отношению к направлению теплового потока и их сильное взаимодействие при распространении против теплового потока. Рассмотренные условия

реализуются в переходной области солнечной атмосферы - волны распространяются от холодной фотосферы в горячую корону, а тепловой поток направлен против из распространения, что дает основание рассматривать обнаруженное взаимодействие волн в качестве механизма нагрева солнечной короны и корон звезд.

6.1.2. Нелинейная обратная задача обработки данных прибора ДИФОС спутника КОРОНАС-Ф (ИЗМИРАН)

На основе обработки данных прибора ДИФОС спутника КОРОНАС-Ф и теоретических расчетов непрозрачности солнечной атмосферы впервые решена обратная задача по определению флуктуаций температуры в фотосфере и установлено существование диффузионных радиационных волн, возбуждаемых глобальными 5-ти минутными колебаниями Солнца (р-модами). Наблюдаемые в рамках гелиосейсмологии флуктуации Солнца и звезд связаны, таким образом, не с самими р-модами, а с возбуждаемыми ими радиационными волнами, что меняет методику расчета флуктуаций яркости звезд и основанную на ней методику гелиосейсмологических наблюдений.

Список публикаций 6.1.1.- 6.1.2.

Д.Кузнецов, Н.С.Джалилов. 16-ти моментное приближение для бесстолкновительной космической плазмы: волны и неустойчивости. Физика плазмы, 2009, том 35, № 10, с.1-15.

V. D. Kuznetsov, N. S. Dzhalilov. Sixteen_Moment Approximation for a Collisionless Space Plasma: Waves and Instabilities. Plasma Physics Reports, 2009, Vol. 35, No. 11, pp. 962–975.

6.2. Мультифрактальная диагностика физических процессов в гелиосфере

6.2.1. Многомасштабные каскадные процессы в физике Солнца и солнечного ветра (ГАО)

Основной целью исследований проводимых в этом году было выделение эволюционных дескрипторов из наблюдаемой геометрии и топологии наблюдаемых магнитограмм. Методами исследования являлись фрактальная геометрия, математическая морфология и вычислительная топология.

А) Выделение предвестников нового всплывающего магнитного потока методами вычислительной топологии. Такой поток играет важную роль в процессах генерации солнечных вспышек и выбросов корональных масс. Мы рассматривали топологический подход для его обнаружения, основанный на анализе связности магнитограммы. Его преимущество заключаются в том, что метод позволяет детектировать появление потока на ранней стадии его появления и позволяет отследить эволюцию во времени фрагментов потока по последовательности MDI-магнитограмм.

Мы использовать определение связности, основанное на понятии ε - цепи, т.е. последовательности элементов разделенных расстоянием не меньше чем некоторый заданный порог. Это понятие транслировалось на меры, т.е. на уровни «серого» для пикселей цифрового MDI изображения. Мы использовали вместо фотометрической меры одну из емкостей Шоке [1,2] - C(e), которая определяется как число пикселов в окне размером $n \times n$, которые неразличимы с заданной точностью e, от центрального пиксела выбранного окна. Очевидно, что число $D(e) = n^2 - C(e)$ измеряет число e различимых пикселей. Для временной последовательности фрагментов магнитограмм, содержащих АО, выберем порог e таким, чтобы для первой из них $D(e) \approx 0$. Тогда значительное

увеличение этой величины можно связать с пикселями нового потока. Наша выборка содержала 10 АО, наиболее продуктивных по вспышкам класса X и М. Из каждой магнитограммы вырезался фрагмент 200×200 пикселей, содержащий АО. Выборка для каждой области содержала ~ 85 фрагментов, охватывающий временной интервал приблизительно равный 6-8 суткам. Изображения близкие к краю лимба не рассматривались и фрагменты вырезались таким образом, чтобы центр АО совпадал с центром изображения. Мы получили кривые эволюции D(e) для всех вспышечных АО и кроме того, для нескольких АО которые дали слабые вспышки класса С. Результаты анализа нескольких АО показали, что вспышечная активность АО тесно связана с поведением D(e) во времени: его увеличение предваряет, либо сопутствует серия вспышек класса М и Х.



На Рис. 1 приведены, в качестве примера, график эволюции D(e) для AO 10375. Столбиками на рисунке обозначена вспышечная продуктивность AO. Высота столбика соответствует величине вспышки, сила вспышки отложена на правой шкале. Перевод класса вспышки в числовую величину осуществлялся стандартным способом: балл вспышек класса C оставлялся без изменений, класса M умножался на 10, класса X на 100, класса B делился на 10.

Область АО10375 вышла из за лимба спокойной, затем дала серию вспышек в центре диска и на лимбе. Из рисунка видно, что этому описанию вполне соответствует поведение D(e). Существенно, что для областей не давших вспышек, либо продуцирующих слабые вспышки класса С динамика D(e) выглядит как нерегулярные (хаотические) колебания с амплитудой, не превышающей $D(e) \approx 40 \div 50$. Мы намерены продолжить эту работу, увеличив объем выборки АО

2) Анализ возможных источников мультифрактального скейлинга магнитограмм. В последнее время для предсказания Солнечных вспышек в ряде работ предлагается использовать масштабные (скейлинговые) свойства магнитограмм. Эвристические соображения, основанные большом магнитном числе Рейнольдса, указывают на возможность сценария полностью развитой турбулентности в солнечных магнитных полях. В этом случае следует ожидать проявления свойств статистической масштабной инвариантности, которое можно обнаружить с помощью так называемого мультифрактального спектра. Предполагается, что характеристики спектра меняются незадолго до вспышек. Следует заметить, что в теории речь идет о турбулентности на масштабах ~ 10^2 км. Однако, доступные наблюдаемые масштабы на MDI-магнитограммах (SOHO) на порядок больше. Поэтому, фактически, можно говорить лишь о крупномасштабных «следах» исходного скейлинга. Оценки мультифрактального спектра для цифровых изображений вызывают большие трудности, связанные с дискретным характером носителя и большой изменчивостью контраста. Поэтому, спектры, приведенные в ряде работ имеют форму, далекую от канонической.



Рис.2. Мультифрактальные спектры для «фона». Параметр D-порог для оценки емкости, L-масштаб окрестности.

Однако, большая вариабельность поля не позволяет уверенно выделить «инерционный диапазон», т.е. интервал масштабов, на котором можно оценить f(a) по наклонам графиков f(q) и a(q), построенных в двойном логарифмическом масштабе. Для того, чтобы избежать эту трудность, мы предложили использовать вместо меры $P_i(e)$ - емкости Шоке, которые не аддитивны, но сохраняют свойство монотонности. В принципе существуют три варианта емкостей: максимальное (минимальное) значение «уровня серого» в малой окрестности пиксела или число пикселов в окрестности, не различимых относительно заданного порога. На Рисунке 2 приведены, спектры, полученные с помощью упомянутой последней емкости для фрагмента 500х500 пикселей MDI магнитограммы, вне Активной Области (АО). Спектры имеют каноническую выпуклую вверх форму.

Следует заметить, однако, что полностью развитая турбулентность не является источником обнаруженного скейлинга. Оказывается, единственным что все природных высококонтрастные цифровые изображения сцен обладают мультифрактальными свойствами, природа которого до конца не выяснена[7,8]. Статистика отсчетов таких изображений имеет ярко выраженные особенности: большой эксцесс и тяжелые хвосты. Мы использовали базу данных цифровых природных изображений [10] и оценили для некоторых из них мультифрактальные спектры. В качестве примера, на рисунке 3 приведены фрагменты изображений коры пробкового дерева и гальки, вместе с полученными для них мультифрактальными спектрами. Видно, что спектры коры и гальки имеют каноническую, выпуклую вверх, форму. Полученные спектры аналогичны приведенным выше. Таким образом, существуют по меньшей мере две возможных причины происхождения мультифрактального скейлинга в фотосферных магнитных полях. Первая связана с существованием полностью развитой турбулентности. Вторая может быть проявлением универсальных свойств высококонтрастных цифровых изображений природных ландшафтов. .

Доклады на конференциях

1.Н.Г. Макаренко Геометрия случайных полей. М. МИФИ. 25 - 29 января 2010 г. (Лекция)

2.Н.Г. Макаренко Геометрия и топология цифровых изображений. Физика Космоса, 1-5 февраля 2010 Коуровка, Екатерибургк (Лекция)

^{3.}Князева И.С., Макаренко Н.Г. Обнаружение всплывающего магнитного потока из топологии магнитограмм. К о н ф е р е н ц и я «Физика плазмы в солнечной системе» 8-12 февраля 2010 г., ИКИ РАН (стендовый доклад)

4. Макаренко Н.Г. Геометрия случайных полей: методы и приложения. // IX Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» ХАОС-2010 4.10-9.10 2010 Саратов. Лекция

5.Князева И.С.,Каримова Л.М., Макаренко Н.Г О природе мультифрактального скейлинга MDIмагнитограмм //Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2010". 3-9 октябрь 2010 г. Санкт-Петербург, ГАО РАН постер.

Публикации

1. И. С. Князева, Н. Г. Макаренко, Л. М. Каримова. Топология магнитных полей по MDI-данным: фоновое поле// **Астрон. Ж.** (2010) Т. 87, № 8, С. 812-821

2.Мильков Д.А., Князева И.С., Макаренко Н.Г. Мультифрактальный и топологический анализ сложности магнитного поля Солнца.// Научная сессия МИФИ-2010. Сб.научных трудов. т.IV. НИЯУ МИФИ Москва 2010 С.37-39

3.Князева И.С., Макаренко Н.Г. Всплывающий магнитный поток из топологии MDI, Научная сессия МИФИ-2010.//Сб.научных трудов. т.IV. НИЯУ МИФИ Москва 2010. С.75-78

4. Князева И.С., Каримова Л.М., Макаренко Н.Г О природе мультифрактального скейлинга MDIмагнитограмм //Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика-2010". 3-9 октябрь 2010 г. Санкт-Петербург, ГАО РАН стр.205-208..

Две статьи подготовлены к печати.

Исполнитель темы Князева И.С. успешно защитила 14 мая 2010 г. кандидатскую диссертацию: Анализ и Диагностика фотосферных магнитных полей Солнца по MDI данным методами стохастической геометрии.

6.2.2. Полностью нелинейные электростатические волны в электронно-позитронной плазме

Разработана теория полностью нелинейных электростатических волн в плазме, содержащей электроны, позитроны и ионы, основанная на точном решении исходных уравнений, описывающих электронно-позитронную плазму. В результате численных расчетов показано, что плазменная система имеет множество динамических квазистационарных состояний в форме волновых структур, включающих, в частности, структуры с заостренными профилями электронной и/или позитронной концентрации. Волны большой амплитуды с необходимостью имеют также и большие фазовые скорости, тогда как волны малой амплитуды распространяются как с большими, так и с малыми скоростями. Поскольку волны в данном рассмотрении являются точными решениями исходных уравнений, они оказываются устойчивыми по отношению к возбуждению малых возмущений. Однако достаточно сильные возмущения могут эволюционировать в волны, соответствующие соседнему состоянию. Полученные результаты применимы для интерпретации нестационарных явлений в ранней Вселенной, центрах галактик, магнитосферах пульсаров, микроквазарах, межзвездных струйных течениях и т.д., включающих генерацию электронно-позитронных пар и/или эмиссию позитронов.

Gaimin Lu, Yue Liu, Youmei Wang, L. Stenflo, S.I. Popel, and M.Y. Yu, Fully Nonlinear Electrostatic Waves in Electron-Positron Plasmas, Journal of Plasma Physics 76, parts 3 & 4 (2010) 267-275.

Заключение

План исследований на 2010 год выполнен. Работы по программе ОФН-15 показал 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-15, указывает большой интерес неакадемических организаций к участию в Программе. Совет Программы, равно как и все участники проектов считают целесообразным продолжить Программу Отделения физических наук «Плазменныепроцессы в солнечной системе» (ОФН-15) в 2011 году.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

средств по организациям-исполнителям заданий Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН

«Плазменные процессы в солнечной системе» на 2010 год (название программы)

№ п/п	Наименование организации	Объем финансирования (тыс. рублей) в 2010 году
1.	Институт космических исследований	2330
	(включая Главную астрономическую	
	обсерваторию)	
	 в том числе ИКИ – 1980 тыс.руб. 	
	 в том числе ГАО – 350 тыс.руб. 	
2.	Институт прикладной физики	1170
3.	Институт земного магнетизма,	650
	ионосферы и распространения	
	радиоволн	
4.	Институт радиотехники и электроники	650
5.	Институт общей физики	350
6.	Физический институт (включая	360
	Пущинскую радиоастрономическую	
	обсерваторию Физического Института)	
	6.1. в том числе ФИ – 120 тыс.руб.	
	6.2. в том числе ПРАО – 240 тыс.руб.	
7.	Специальная астрофизическая	340
	обсерватория	
8.	Полярный геофизический институт	330
9.	Физико-технический институт	120
	Итого (факт)	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
- Динамика магнитосфер Земли и планет, руководитель А.Г.Демехов
 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 ВУФдиапазонах 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 декаметрового 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-атомсфера Земли на воздействие сллнечного ветра и ультрафиолетового измлучения 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 мазере, 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)