

«Утверждаю»

Академик-секретарь ОФН РАН

_____ **Академик В.А. Матвеев**

« »

2010 г.

Отчет за 2009г.

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 10 институтов Отделения физических наук РАН, 2-х институтов Сибирского Отделения РАН (ИСЗФ и ИЛМ), а также ученых МГУ (НИЯФ), 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 (ФТИ, ИДГ и ИЯИ РАН) и неакадемических организаций финансировались из собственных средств.

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 2 или сайт Программы <http://solarwind.cosmos.ru/>), посвященных исследованию различных аспектов общей задачи.

1. Физические процессы во внешних областях Солнца, руководители А.В. Степанов, В.М. Богод
2. Физические процессы в гелиосфере, руководитель Ю.И. Ермолаев
3. Динамика магнитосфер Земли и планет, руководитель А.Г. Демехов
4. Ионосферные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли и планет земной группы, руководитель Н.А. Арманд, 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 2009 год задачи исследований полностью выполнены и получены важные результаты мирового уровня. Полученные результаты опубликованы в 286 работах, из них опубликовано в зарубежных изданиях – 95, опубликовано в российских изданиях – 97, публикации в материалах конференций – 94, находятся в печати – около 70 работ, сделано около 200 докладов на отечественных и международных конференциях. Полученные результаты кратко представлены в следующем разделе.

Основные научные результаты

В 2009 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. Теоретически показана возможность существования двух разновидностей звезд солнечного типа – доноров и акцепторов межзвездного вещества.

Такие разновидности звезд следует искать путем наблюдения сдвигов спектральных

линий в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Нерешенный астрофизический вопрос о том, когда и как начал дуть солнечный ветер, до сих пор не имеет определенного ответа. В связи с этим произведено теоретическое исследование политропных моделей, впервые развитых Бонди в середине 1950-х годов, и показана возможность бифуркации, то есть существования звезд солнечного типа, ничем существенным не отличающихся от него за исключением отсутствия солнечного ветра или продолжающих оставаться в стадии аккреции. Указана возможность обнаружения таких звездных объектов путем наблюдения доплеровских сдвигов спектральных линий излучения в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Согласно современным космогоническим представлениям, Солнце сформировалось из холодного газо-пылевого облака путем его аккреции. Надежно установлено, что в настоящее время поступление межзвездного вещества на Солнце мало по сравнению с потерями его массы на испускание солнечного ветра, которые в свою очередь малы по сравнению с потерей массы покоя на излучение фотонов и нейтрино. Когда и как произошел переход от преобладания накопления вещества к преобладанию потерь в случае Солнца не известно. В эволюции звезд типа Солнца можно отметить несколько характерных стадий. Среди них важную роль играет начало термоядерного горения, а также переход от ламинарной стадии к турбулентной конвекции внутри звезды. Обусловлен ли поток солнечного ветра мощным излучением Солнца или же это в основном следствие конвекции и магнитной активности, как полагают ныне, – предстоит еще выяснить. Сейчас нельзя исключить ни ту, ни другую возможность, а также их комбинацию на разной шкале времени. Этот вопрос не может быть решен чисто теоретически – нужны новые наблюдения. В результате проведенного исследования достигнуто понимание того обстоятельства, что солнечный ветер не является простым следствием нагрева короны, как это было принято думать в течение половины столетия на основе тепловой модели Паркера, а имеет гораздо более глубокую эволюционную и электромагнитную природу. Магнитные, механические и тепловые «насосы» в короне Солнца при других условиях эволюции вполне могли бы продолжать поставлять вещество на Солнце из межзвездного окружения. Возможность существования однопоточных звезд-акцепторов и звезд-доноров нуждается в дальнейшем исследовании.

Veselovsky I. When and how the solar wind started to blow? Space Research Today, Number 174, pp. 67-68, 2009.

I.S. Veselovsky. On the bifurcation in the Bondi model and the solar wind origin problem. Solar Wind 12. Twelfth International Solar Wind Conference, 21-26 June 2009, Saint Malo, France, Abstracts, p.217.

Igor S. Veselovsky. Solar wind origins and statistical properties. (Invited talk), IAGA2 – 2009, "Solar Wind-Space Environment Interaction" Cairo, Egypt, December 4-8, 2009. (<http://iaga.cu.edu.eg/>).

1.1.2. Исследована трехмерная эволюция магнитных полей в короне солнца и быстрых потоков солнечного ветра в минимуме 23-го цикла солнечной активности.

Численный метод, предложенный ранее в работе Веселовского и Иванова (2006), использован для расчета открытых и замкнутых полей в короне Солнца и межпланетном пространстве на основе наблюдений фотосферного магнитного поля в марте-декабре 2007 г. Эти расчеты сопоставлены со стереоскопическими изображениями корональных дыр, параметрами межпланетного магнитного поля и солнечного ветра по данным космических аппаратов STEREO, SOHO и ACE в это же время. Уточнены представления об источниках перманентных и транзитных потоков быстрого солнечного ветра на орбите Земли.

Yakovchouk, O. S.; Veselovsky, I. S.; Mursula, K.; Shugai, Yu. S., 3D evolution of solar magnetic fields and high-speed solar wind streams near the minimum of solar cycle 23. "Universal Heliophysical Processes", Proceedings of the International Astronomical Union, 2009, IAU Symposium, Volume 257, p. 601-603. DOI:10.1017/S1743921309029913

1.1.3. Корреляционные связи между площадью корональных дыр, скоростью солнечного ветра и локальными магнитными индексами в канадском регионе на спаде 23 – го цикла солнечной активности.

Геомагнитные возмущения в Канадском регионе сопоставлены с их солнечными и гелиосферными источниками в период спада цикла солнечной активности, когда были ярко выражены рекуррентные потоки солнечного ветра из низкоширотных корональных дыр. Для вычисления площадей корональных дыр создана оригинальная программа обработки рентгеновских изображений Солнца. Используются данные нескольких космических аппаратов. Линейный корреляционный анализ проведен с использованием дневных и часовых зональных индексов геомагнитной активности, скорости солнечного ветра и площади корональных дыр. Полученные коэффициенты корреляции между геомагнитными, межпланетными и солнечными характеристиками варьировались от довольно низких между площадями корональных дыр и геомагнитной активностью (0,17-0,48); промежуточных между площадями корональных дыр и скоростью солнечного ветра (0,40-0,65) и до весьма высоких между скоростью солнечного ветра и геомагнитной активностью (0,50-0,70). Показано, что более аккуратный учет изменений исследуемых параметров, связанный с изменениями в ионосфере (различной освещенностью в течение года), а также вариаций гелиоширотного смещения между Землей, Солнцем и космическим аппаратом, позволяет значительно улучшить значения коэффициента корреляции.

Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Трищенко Л.Д., Исследование корреляционных связей между площадью корональных дыр, скоростью солнечного ветра и локальными магнитными индексами в канадском регионе на спаде 23-го цикла солнечной активности, Геомагнетизм и аэрономия, 2009, Т.49, №4, С. 435-445.

1.1.4. Крупномасштабное солнечное магнитное поле и распространение СКЛ в гелиосфере

На примере наблюдений солнечных космических лучей (СКЛ) в различных точках гелиосферы в декабре 2006 года нами исследовалась роль крупномасштабной структуры солнечного магнитного поля при распространении СКЛ до наблюдателя [1, 2].

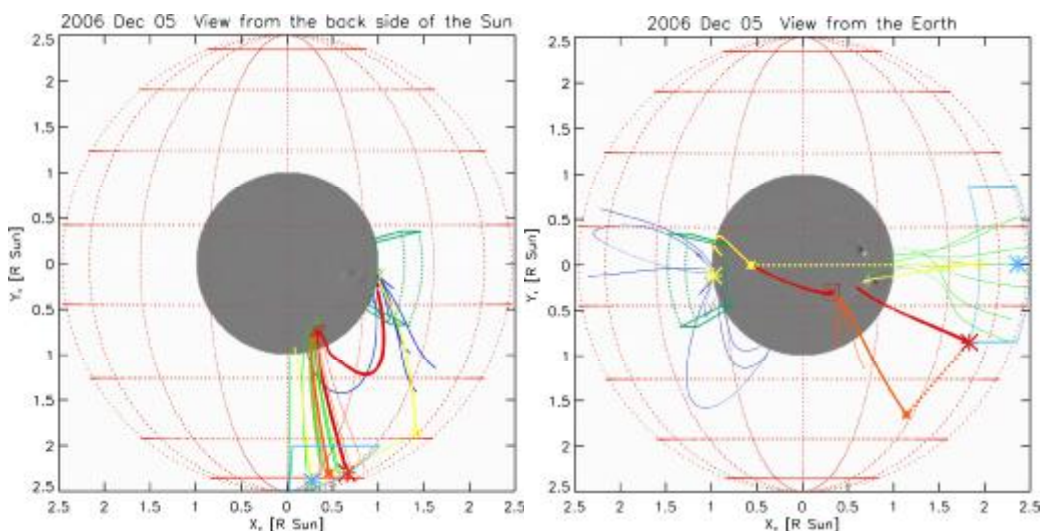


Рис. 1. Соединение магнитными силовыми линиями окрестности родительской вспышки (зеленые линии) с окрестностью основания Паркеровской спирали КА (голубые линии) на поверхности источника (красная сетка) в событие 5 декабря 2006 года. Слева: соединение КА ULYSSES; справа – соединение Земли. Красные линии показывают наикратчайшее соединение.

Активная область 10930, ставшая видимой на восточном лимбе Солнца в начале декабря 2006 года, стала источником четырех рентгеновских вспышек (5, 6, 13 и 14 декабря) и СКЛ

вблизи Земли. Частицы СКЛ также наблюдались на гелиоцентрическом расстоянии 2.8 а.е. в южной полярной шапке (70°) с борта КА ULYSSES. прибором KET/Ulysses в диапазоне от 6 МэВ/нуклон до 2 ГэВ/нуклон. Используя модель потенциального магнитного поля мы разработали методику расчета магнитных силовых линий в короне внутри сферического слоя 1.5 R над фотосферой для проверки магнитного соединения родительских вспышек с основаниями силовых линий Паркеровской спирали, проходящих через тот или иной КА. Рисунок 1 иллюстрирует применение модели на примере события 5 декабря 2006 года. Таким образом, квазистационарная модель коронального магнитного поля может качественно объяснить наблюдаемые особенности событий 5, 13 и 14 декабря 2006 на КА ULYSSES, GOES, STEREO. Однако модель адекватно не объясняет наблюдения 6 декабря вблизи Земли, возможно, из-за переконфигурации коронального и межпланетного магнитного поля в результате распространения CME от события 5 декабря.

А. Струминский, И. Зимовец, Б. Хибер и А. Классен, Роль крупномасштабного солнечного магнитного поля при распространении СКЛ в трехмерной гелиосфере, 5-ая конференция "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, февраль 2009

A. Struminsky, I. Zimovets, B. Heber and A. Klassen, The role of large scale solar magnetic field for distribution of SEP in the 3D Heliosphere, PROCEEDINGS OF THE 31st ICRC (CD-rom), LODZ, July 2009

А.Б. Струминский, СКЛ в 3D гелиосфере по данным ULYSSES, Семинар под руководством профессора Сомова Б.В. "Космическая электродинамика и физика Солнца". ГАИШ, Москва.

1.1.5. Распространение ускоренных заряженных частиц в модельном магнитном поле солнечной короны

Развивается методика проверки идеи о существенном широтном и долготном распространении ускоренных во вспышке заряженных частиц в магнитном поле солнечной короны в предположении его потенциальности и квазистационарности. Предполагается, что характер коронального распространения ускоренных в локальных вспышечных областях заряженных частиц определяется исключительно магнитным полем солнечной атмосферы, поскольку гирорадиус частиц значительно меньше характерного масштаба магнитоплазменных структур в короне. Используется Potential Field Source Surface модель. В рамках используемой модели разработан алгоритм поиска возможного магнитного соединения оснований паркеровских спиралей межпланетного магнитного поля на поверхностной сфере (2.5 радиуса Солнца) со вспышечной областью. Проверяется адекватность моделей типа "птичьей клетки", в которых предполагается, что ускоренные заряженные частицы могут распространяться в короне посредством контактирующих магнитных петель. Анализ 8 солнечных протонных событий, наблюдаемых одновременно в плоскости эклиптики космическими аппаратом GOES и STEREO и на высоких гелиоширотах аппаратом ULYSSES, в том числе уникальной серии из 4 событий декабря 2006 г., и 12 импульсных электронных событий, наблюдаемых в плоскости эклиптики прибором EPHIN/SOHO, указывает на то, что потенциальное магнитное поле короны действительно отвечает за доставку ускоренных частиц в различные области внутренней гелиосферы. Но, в некоторых крупных событиях необходимо учитывать влияние динамических процессов в короне (эрупцию волокна, корональный выброс массы и т.д.), отклонение состояния магнитного поля от потенциального (наличие электрических токов). Необходимы более детальные сведения о распределении магнитного поля на фотосфере, в том числе на невидимой стороне Солнца и на полюсах.

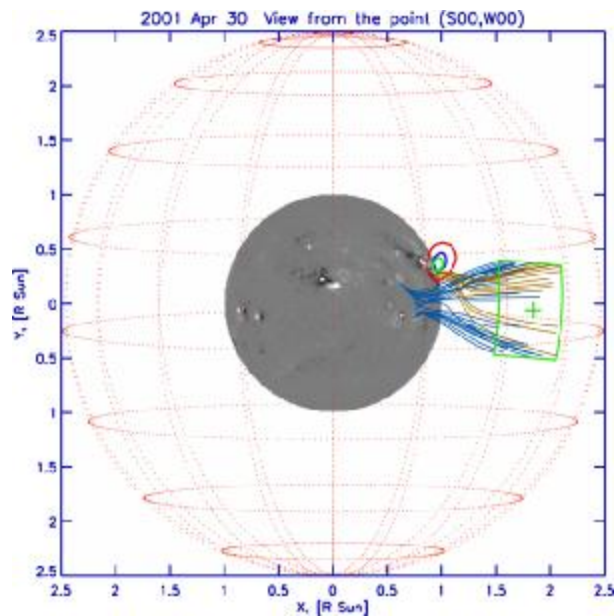


Рисунок 1. Соединение основания паркерской спирали межпланетного магнитного поля (зеленый квадрат и крестик) для Земли со всплывающей областью посредством силовых линий модельного потенциального магнитного поля солнечной короны (коричневые линии). Красный, синий и зеленый эллипс показывает расположение коронального радиовсплеска III-типа на частотах 164, 237 и 327 МГц, соответственно, по данным радиогелиографа Нансе. Черно-белое изображение в центре – магнитограмма MDI/SOHO.

Zimovets I., On the problem of solar energetic particle transport in 3D Heliosphere. Scientific workshop, Christian-Albrechts-University Kiel, Germany, 20 April 2009.

Zimovets I., A. Klassen, R. Gomez-Herrero, B. Heber and K.-L. Klein, Near-relativistic electron spikes in the interplanetary medium and their origin at the Sun. STEREO-3/SOHO-22 Workshop, Bournemouth, Dorset, England, April 27-May 1, 2009.

Зимовец И.В., Всплески солнечных энергичных электронов в межпланетной среде. Научный семинар отдела 54, ИКИ, Москва, 8 июня 2009.

Зимовец И.В., Всплески солнечных энергичных электронов в межпланетной среде. Научный семинар под руководством профессора Сомова Б.В. "Космическая электродинамика и физика Солнца", ГАИШ, Москва, 15 июня 2009.

Зимовец И.В., Струминский А.Б., Хибер Б., Распространение ускоренных заряженных частиц в модельном магнитном поле солнечной короны. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009", Пулковско, Санкт-Петербург, 5-10 июля 2009.

1.1.6. Описание структуры и топологических изменений солнечных корональных стримеров и дальней области геомагнитного хвоста в рамках кинетической теории бесстолкновительной плазмы

Проведены вычисления значения безразмерного параметра G_v , управляющего топологией магнитосферы и коронального стримера, в зависимости от значения параметра каппа, характеризующего функции распределения потока солнечного ветра и солнечной короны. Значение параметра G_v характеризует топологию, а при достаточно быстром изменении G_v перестройку магнитосфероподобных плазменных объектов с явлением выброса плазматических объектов. Показано, что безразмерный параметр G_v вычисляется по состоянию потока солнечного ветра перед магнитосферой, либо по состоянию расширяющейся короны в окрестности стримера, а это состояние в свою очередь определяется формой функции распределения частиц (ФРЧ) солнечного ветра. В проведенном нами кинетическом рассмотрении величина G_v определяется по форме изотропной функции распределения частиц $f(\frac{r}{r_s})$ набегающего потока. В этом случае G_v выражается через отношение анизотропии потока по энергии $\kappa_D \approx -2v'^2 \int du (\partial f / \partial u^2)$ нерезонансных частиц к анизотропии потока по импульсу

$\kappa_G \approx v' \pi f(v')$ резонансных частиц $G_v \approx \kappa_D / \kappa_G$. Параметр G_v не зависит от концентрации частиц плазмы и при неизменной скорости может меняться только из-за перестройки формы функции распределения потока.

В качестве тестовой функции распределения частиц (ФРЧ) была выбрано «каппа» распределение, часто наблюдаемое в космической плазме в виде «halo» и «core» распределений.

$$f_h = \frac{n_0}{p^{3/2} v_a^3 k^{3/2}} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k-3/2)} \left[1 + \frac{1}{k} \frac{(\mathbf{V} - \mathbf{V}')^2}{v_a^2} \right]^{-k} \quad f_c = \frac{n_0}{p^{3/2} v_a^3 k^{3/2}} \frac{\Gamma(k+5/2)}{\Gamma(k+1)} \left[1 - \frac{1}{k} \frac{\mathbf{V}^2}{v_a^2} \right]^k$$

Установлено, что параметр G_v находится в сильной и монотонной зависимости от значения параметра k , характеризующего формы обобщенных «каппа» ФРЧ плазмы по скоростям. Для «каппа» ФРЧ типа «halo» с длинными степенными хвостами и положительными значениями k было получено уменьшение значения G_v с уменьшением k относительно значений G_{vm} , полученных для максвелловской ФРЧ. Для «каппа» ФРЧ «core», существующих при отрицательных значениях k и характеризующих ядро ФРЧ, было получено увеличение параметра G_v относительно G_{vm} при уменьшении k . Такие изменения свидетельствуют о возможности управления топологией магнитосфер и стримеров из состояний с хвостом/стримером в диполизованное/шлемовидное состояние. А при достаточно резком изменении параметра k в потоке получения эффекта суббури, что соответствует корональному выбросу массы в стримере.

Губченко В.М., Смирнов А.В. Солнечные стримеры в трехмерном кинетическом рассмотрении // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009", Санкт-Петербург, 5-11 июля 2009. СПб.:Изд. ГАО РАН, 2009. С. 141-146.

Губченко В.М., Смирнов А.В. О новом параметре управляющем электромагнитным взаимодействием замагниченного тела с набегающим гиперзвуковым потоком. Не МГД анализ // Abstracts of The 8th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, March 31—April 2, 2009, Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia. P.102-103.

Gubchenko V.M. From 1D current sheet approach to the 3D magnetosphere/solar streamer modeling in large scale kinetics // Abstracts of International Conference "Plasma-wave processes in the Earth's and planetary magnetospheres, ionospheres, and atmospheres". — Н.Новгород: ИПФ РАН, 2009. — С. 36.

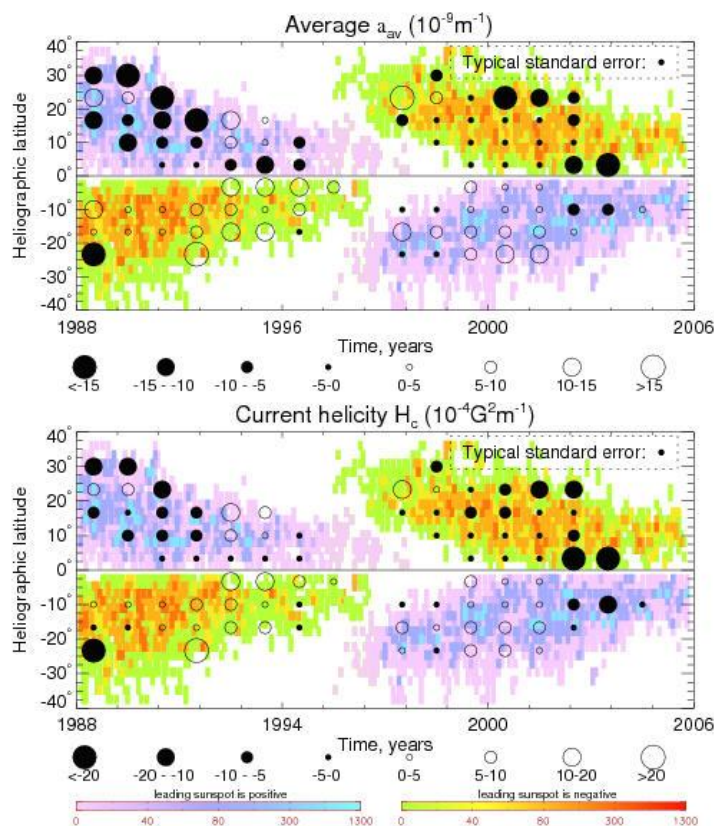
Gubchenko V.M. On 3D Magnetosphere Topology Governed by the Shape of the Input Solar Wind VDF: New Large Kinetic Scales and Dimensionless Parameters in One Self-Consistent Analytical Kinetic Approach // The 6th Asia Oceania Geoscience Society Conference and the Annual General Meeting. 11-15 August 2009, Singapore. ST18-A003.

1.1.7. Результаты ИЗМИРАН по проекту «Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы»

А) Совместно с китайскими учеными по данным магнитографа Хуайроу изучены изменения спиральности в цикле магнитной активности. и некоторые методы анализа динамики солнечной цикличности. Методы теории временных рядов могут предсказывать амплитуду ряда чисел солнечных пятен с достаточно высокой надежностью. Однако, без учета нелинейности механизма динамо временные характеристики солнечной цикличности недоступны для анализа. Введение спиральности позволяет учитывать нелинейность солнечного цикла. Методы ассимиляции данных, опирающиеся на модель динамо, включающую спиральность, могли бы позволить предсказывать как амплитуду, так и фазу солнечного цикла.

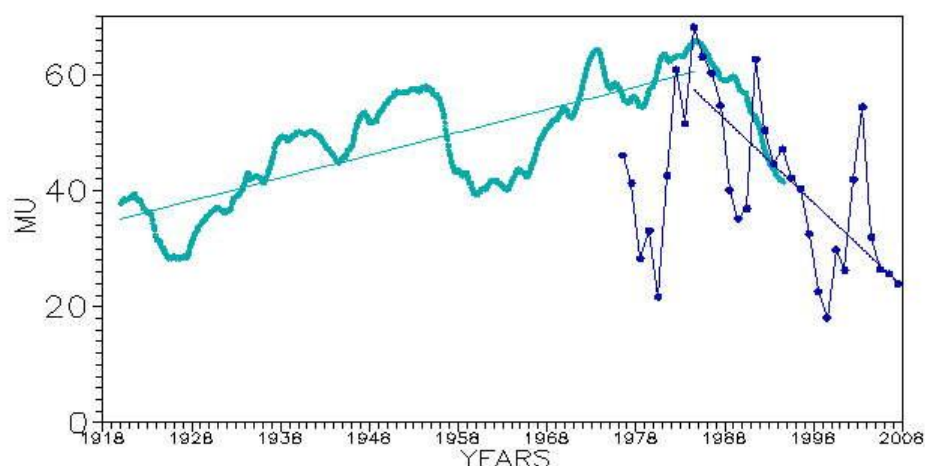
Б) Получено правило полярности пространственно-временного распределения токовой спиральности. Это правило сопоставимо с известным правилом полярности Хэйла для солнечных групп пятен, но существенно отличается от него. Согласно предлагаемому правилу, токовая спиральность антисимметрична относительно

солнечного экватора, но для данного полушария не меняет (в отличие от групп пятен) знак от цикла к циклу. Кроме того (в отличие от групп пятен), на широтно-временной диаграмме есть сравнительно большие статистически значимые области, в которых токовая спиральность имеет знак, противоположный знаку в среднем по полушарию. Предлагаемая закономерность обоснована в рамках теории солнечного динамо и подтверждена наблюдениями.



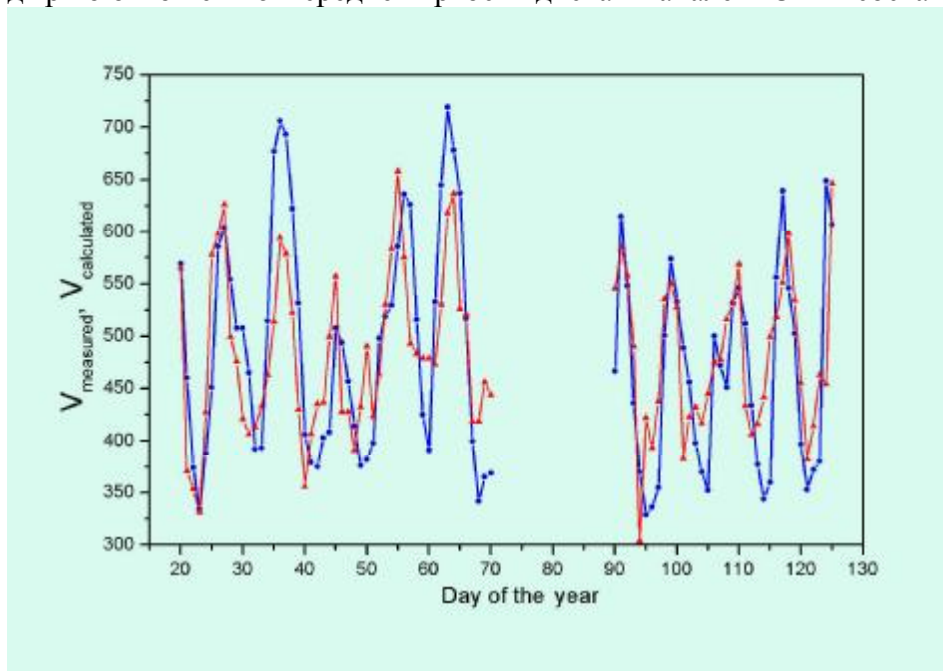
На этом рисунке показано положение групп с разными значениями спиральности за последние 18 лет. Видно, что знак спиральности определяется знаком полушария и не меняется при переходе от 22 к 23 циклу.

В) Продолжены работы по исследованию характеристик и свойств последнего 22-летнего цикла СА. Впервые за достоверный период наблюдений солнечной активности четный цикл СА стал больше нечетного вопреки известному правилу Гневешева-Оля. В этом цикле (в обоих компонентах) впервые в истории наблюдений максимум радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см значимо (на год-полтора) запаздывал относительно максимума чисел Вольфа. Основные характеристики прошедшего 23 цикла солнечной активности практически полностью соответствуют характеристикам солнечных циклов средней величины, а ряд его особенностей могут свидетельствовать о смене режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца. В частности, показано, что напряженность полярного магнитного поля постепенно падает в течение последних трех циклов. Это связано с тем, что постепенный рост магнитного момента диполя, наблюдавшийся в течение 1915-1976 года в последние 30 лет сменился спадом. В то же время поля промежуточных масштабов (как например в изолированных корональных дырах) были необычно сильны в последнее время. В результате искривленность гелиосферного экватора выше обычной для этой фазы цикла величины. Совокупность данных указывает на возможное наступление векового минимума солнечной активности. Это особенно важно в связи с предполагаемым глобальным потеплением и указывает на то, что температурные явления на Земле могут стабилизироваться.



В работах V. I. Makarov, V. N. Obridko, and A. G. Tlatov *Astronomicheski Zhurnal*, Vol. 78, No. 9, 2001, pp. 859–864., и V.I.MAKAROV, A.G.TLATOV, D.K.CALLEBAUT, AND V.N.OBRIDKO INCREASE OF THE MAGNETIC FLUX FROM POLAR ZONES OF THE SUN IN THE LAST 120 YEARS показано, что магнитный момент растет до 1984-1985 года, а потом резко падает. Но тогда данных хватало только до 1991 года. Сейчас можно уверенно говорить о спаде магнитного момента в течение последних 3 циклов.

Г) Показано, что контраст корональных дыр, в той же мере как их площадь, определяет скорость связанных с ними потоков солнечного ветра. Проанализировано более 400 снимков в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$. Временной интервал покрывает около 1500 дней на нисходящей ветви 23-го цикла с 2002 по 2006 гг. Для этого интервала изучены все корональные дыры, не совпадавшие с корональными выбросами масс. Проведено также сопоставление с другими характеристиками солнечного ветра (плотность, температура, магнитное поле). Получены относительно высокие значения коэффициентов корреляции со скоростью (0.70–0.89), особенно в периоды умеренной активности, так что данный метод может быть использован для ежедневного прогноза. Оценка яркости корональных дыр по отношению к средней яркости диска в канале $\lambda 284 \text{ \AA}$ составляет около 25%.



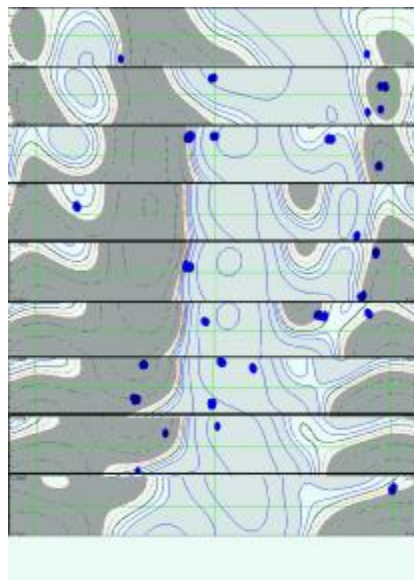
На рисунке в качестве примера показано сопоставление измеренных у Земли и рассчитанных по данным о яркости корональных дыр скоростей солнечного ветра.

Д) Проведен анализ существования колебаний с периодом 1.3 года в течение последних 8 циклов. Показано, что они существовали все это время, но лучше всего проявляются в

фазе максимума и в начале фазы спада. Тот же период обнаружен во вращении эффективного солнечного диполя. Это означает, что колебания с периодом 1.3 года являются фундаментальным свойством глобальных полей.

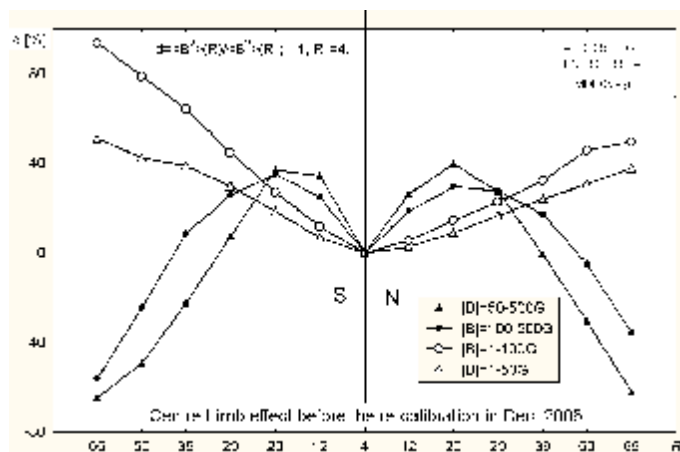
Е) Показано, что магнитное поле, переносимое к Земле солнечным ветром, определяется не точкой гелиопроекции, а формируется в обширной зоне от -40° до $+40^\circ$ как по широте, так и по долготе. Это естественным образом объясняет дефицит значений поля вблизи нейтральной линии (двухвершинность распределения в отличие от одновершинности в точке гелиопроекции. При этом асимметрия распределения межпланетного магнитного поля имеет солнечное происхождение. Знак асимметрии согласуется со знаком асимметрии на Солнце при усреднении по протяженной области.

Ж) Проанализировано явление активных долгот на Солнце. Показано, что они являются следствием взаимодействия глобального (возможно полоидального) и асимметричного (квадрупольеподобного) полей. Собственно “Активные долготы” – это не совсем точный термин. Они не постоянны ни во времени, ни в пространстве и тесно связаны со структурой крупномасштабного поля. “Активные долготы” более четко выражены в более мощных событиях и группах пятен.



На рисунке показано расположение мощных активных областей относительно нейтральных линий крупномасштабного поля. Около 70% пятен с площадью больше >500 миллионов долей полушеры расположены на расстояниях меньше 20 градусов по долготе от нейтральной линии крупномасштабного поля.

З) По данным SOHO/MDI (архив магнитных карт с разрешением $\sim 2''$) исследовалась динамика мелкомасштабного фонового магнитного поля (ФМП) Солнца в 23-м солнечном цикле. Используя средние оценки $\langle B \rangle$ и $\langle B^2 \rangle$ наблюдаемого магнитного поля B для различных участков поверхности Солнца и при разных уровнях B , анализировались циклические изменения ФМП и поверхностная структура ФМП. Установлено, что на широтах ниже 30° циклические изменения $\langle B^2 \rangle$ практически подобны изменениям интегрального потока радиоизлучения $F_{10.7}$. Обнаружено значимое различие ФМП в северном и южном полушариях Солнца, сохраняющееся в течение всего цикла. Найден эффект возрастания ФМП к лимбу Солнца и сделано заключение о существенности трансверсальной составляющей у ФМП. Показано, что мелкомасштабные фоновые относительно слабые магнитные поля образуют особую популяцию, которая имеет свои особые законы циклической вариации



На рисунке показана центр-либб вариация полей разного масштаба. Отрицательная вариация центр – лимб указывает на то, что слабые поля состоят из элементов с преимущественно тангенциальным направлением.

И) Введен новый индекс, характеризующий полное излучение солнечной короны, включающее эмиссию лимба и диска в зеленой линии 5303 Å. Проведен вейвлет-анализ, выявлены эпохи более медленного вращения, совпадающие с временем переполюсовки глобального диполя и существования наклонного ротатора

К) Основные характеристики прошедшего 23 цикла солнечной активности практически полностью соответствуют характеристикам солнечных циклов средней величины, а ряд его особенностей (– характер развития активных областей, число которых до фазы минимума было значительно меньше, чем в предыдущих высоких циклах; –облегчённый выход солнечных высокоэнергичных протонов; – увеличение числа Форбуш-понижений) могут свидетельствовать о смене режима генерации магнитных полей в конвективной зоне Солнца. В этом случае Солнце вступает в период средних и малых циклов СА по числу Вольфа, который может продлиться от 50 до 100 лет. Это может привести к еще большему загрязнению околоземного космического пространства из-за неблагоприятного режима очистки низких орбит от космического мусора, значительному росту радиационного фона в ближнем космосе (ослабление межпланетных магнитных полей даст увеличение концентрации галактических космических лучей в гелиосфере, что уже наблюдалось в текущем затянувшемся минимуме) и другим, возможно, неблагоприятным последствиям. Основные этапы развития текущего 23 цикла солнечной активности следующие:

- минимум 22 солнечного цикла – май 1996 ($W^* = 8.0$);
- начало фазы роста - сентябрь 1997 г.;
- максимум относительного числа солнечных пятен - апрель 2000 г.;
- глобальная переполюсовка общего магнитного поля Солнца - июль - декабрь 2000 г.;
- вторичный максимум относительного числа солнечных пятен - ноябрь 2001 г.;
- максимум потока радиоизлучения на волне 10.7 см - февраль 2002 г.;
- фаза максимума цикла – октябрь 1999 – июнь 2002 г.;
- начало фазы спада - -июль 2002 г.;
- фаза минимума началась с мая 2005 г.;
- точка минимума текущего цикла СА – декабрь 2008 г.

Как показали последние исследования, реальные данные о солнечных циклах ограничены только наблюдаемыми (1849 – 2005 г.) солнечными циклами. Основные спектральные гармоники восстановленных солнечных циклов значительно отличаются от наблюдаемых. Парные объединения циклов (четный – нечетный) подобны между собой (в рамках проведенного анализа), что формально подчеркивает представление о 22-летнем цикле как физически замкнутом процессе. После нейтрализации долговременной компоненты P1 (~150 лет) значительно возрастает однородность параметров циклов, их четкая

дифференциация по четности, а также для циклов 22-23 восстановление нарушенного отношения максимумов. Высокая степень корреляции ряда $P1(t)$ с огибающими компонент $P2$ и $P3$ позволяет работать с преобразованным рядом, у которого парные объединения циклов подобны между собой. Скорректированный восстановленный ряд снимает ряд проблем неоднородности, но ставит новые, которые пока изучаются.

Georgoulis, M. K.; Rust, D. M.; Pevtsov, A. A.; Bernasconi, P. N.; Kuzanyan, K. M. Solar Magnetic Helicity Injected into the Heliosphere: Magnitude, Balance, and Periodicities Over Solar Cycle 23 The Astrophysical Journal Letters, Volume 705, Issue1, pp. L48-L52 (2009).

V. N. Obridko, B. D. Shelting, I. M. Livshits and A. B. Asgarov, Contrast of Coronal Holes and Parameters of Associated Solar Wind Streams, 2009, Solar Physics. Volume 260 Number 1, 191 - 206

Шельтинг Б.Д., Обридко В.Н. Открытые магнитные поля на Солнце и характеристики солнечного ветра у Земли Труды Всероссийской конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика 2009", С.-Петербург, ГАО РАН 467 -470

Июшпа Б.А., Обридко В.Н*, Чертопруд В.Е. МЕЛКОМАСШТАБНОЕ ФОНОВОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА В 23 СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ (Письма в АЖ, 2009, том 36, №6, 472-480)

Обридко В.Н. Крупномасштабная структура и «активные долгины» Труды Всероссийской конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика 2009", С.-Петербург, ГАО РАН 331 336

М.М.Кацова, И.М.Лившиц, Ю.Сикора ВРАЩЕНИЕ СОЛНЦА КАК ЗВЕЗДЫ ПО ПОЛНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ КОРОНЫ В ЗЕЛЕНОЙ ЛИНИИ. Астрономический журнал, 2009

1.1.8. Исследование природы нагрева короны

Исследовано влияние нейтральной компоненты космической плазмы на поток альфвеновских волн в условиях атмосфер Солнца и звезд. Показано, что если их частота гораздо меньше эффективной частоты столкновений между ионами и нейтральными атомами водорода, то волновой поток не зависит от степени ионизации плазмы и определяется амплитудой возмущения магнитного поля. Поэтому утверждение Vranjes et al. (2008) о том, что генерация альфвеновских мод на уровне солнечной фотосферы из-за слабой ионизации вещества является проблематичной, не имеет достаточных оснований.

Исследованы особенности распространения альфвеновских мод тонких магнитных трубок в атмосфере Солнца. В частности, поперечных и крутильных альфвеновских мод. Получено дисперсионное уравнение для поперечных волн, возбуждаемых в неизолированных магнитных трубках. Сделан вывод, что крутильные волны, способны эффективнее поперечных проникать в корону, поскольку они не испытывают действия сил магнитной плавучести. Получены свидетельства в пользу возможности формирования магнитного «покрывала» в хромосфере Солнца. Поток энергии волн альфвеновского типа, генерируемых в фотосфере конвективными движениями, не зависит от степени ионизации плазмы. Коэффициент отражения волн непрерывно убывает с убыванием их периода. Анализируется влияние внешнего магнитного поля на частоту обрезания Спруита для поперечных (изгибных) мод, возбуждающихся в тонких магнитных трубках. Сделан вывод, что альфвеновские волны, генерируемые фотосферными конвективными движениями, могут вносить существенный вклад в нагрев корональной плазмы в спокойных областях Солнца.

Tsap Yu.T.; Stepanov A.V.; Kopylova Y.G. Generation and propagation of Alfvén waves in solar atmosphere Proc. IAU Symposium «Generation and propagation of Alfvén waves in solar atmosphere». 2009, V.257. P.555-561.

Stepanov A.V., Tsap Y.T., Kopylova Y.G. Stellar flare diagnostics from multi-wavelength observations. Abstract book of the XXVIIIth General Assembly of IAU. 2009. P.92.

Yu. T. Tsap, A. V. Stepanov, Yu. G. Kopylova "Energy flux of Alfvén waves in weakly ionized plasma and coronal heating of the Sun" (послана в Astron. Astrophys.)

При исследовании микроволнового излучения активных областей на Солнце впервые обнаружен эффект параметрического резонанса между 5-минутными осцилляциями скорости в солнечной фотосфере и звуковыми колебаниями корональных магнитных

петель, модулирующими микроволновое излучение. Наблюдения солнечных радио всплесков подтверждают наличие резонанса одновременным возбуждением в петле колебаний с периодами соответствующими частоте накачки (5 мин), субгармонике (10 мин) и первой верхней частоте параметрического резонанса (3.3 мин). Дана интерпретация в рамках представления корональной магнитной петли как эквивалентного электрического контура. Сделан вывод, что параметрический резонанс может служить эффективным каналом передачи энергии фотосферных осцилляций в верхние слои солнечной атмосферы.

Stepanov A.V., Zaitsev V.V., Kisliakov A.G., Urpo S.: Parametric interaction of coronal loops with p-modes //Comm. in Asteroseismology 159, 30-32 (2009)

1.1.9. Оценка потока протонов СКЛ по параметрам микроволновых всплесков

Прогнозирование протонных событий является одной из актуальных задач, решаемых в солнечной радиофизике. Известно, что по параметрам микроволновых всплесков можно судить об общем количестве ускоренных частиц и в (Мельников В. Ф. и др., КИ, 1991, 29, 95) было высказано предположение, что декаметровая компонента вспышечного радиоизлучения может служить показателем эффективности выхода частиц в межпланетное пространство (МП). В настоящей работе получено убедительное свидетельство, что точность оценки потока протонов СКЛ по параметрам микроволновых (μ) всплесков действительно заметно улучшается при учете интегральной интенсивности декаметровой компоненты радиоизлучения соответствующих вспышек.

Исследуемая выборка включала 49 протонных событий, зарегистрированных в 23 цикле солнечной активности. Протонные события характеризовались максимальной интенсивностью потока протонов СКЛ I_p с энергией больше 25 МэВ, максимальным значением потока радиоизлучения F_m , F_{dec} и эффективной длительностью радиовсплеска T_m , T_{dec} на частоте спектрального микроволнового (μ) f_m и ДКМ максимума f_{dec} , соответственно.

Сравнительный анализ связи потока протонов I_p СКЛ с указанными параметрами всплесков

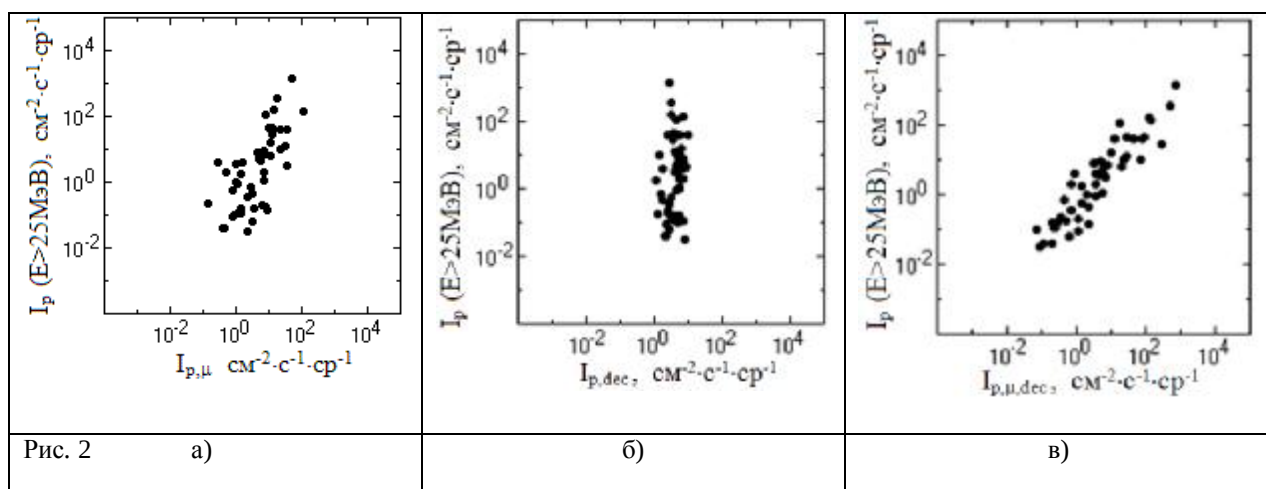
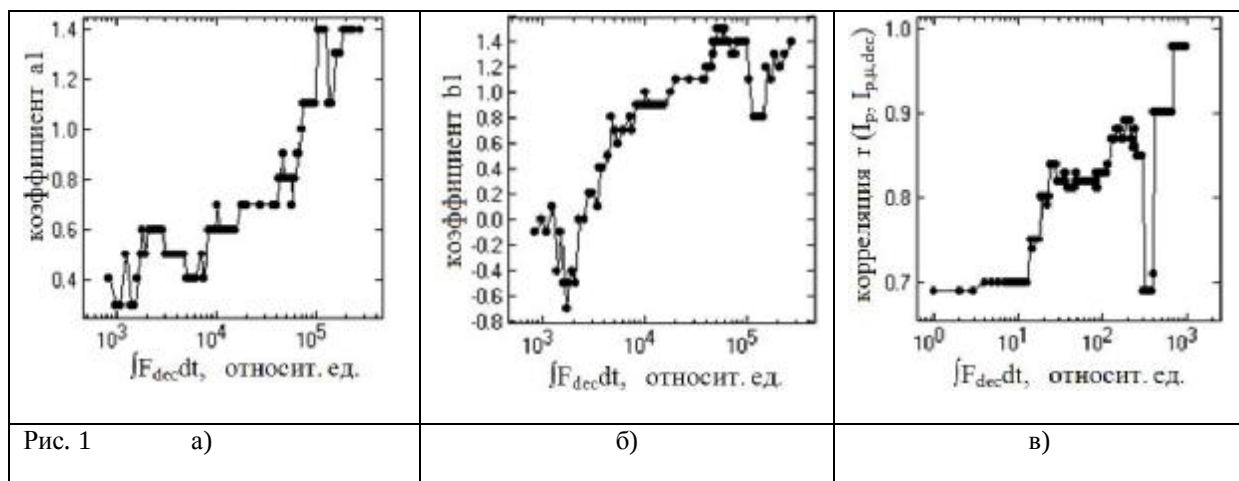
$$\lg I_{p,f} = a \lg F_f + b \lg T_f + c \lg f + d \quad (1)$$

показал, что коэффициент корреляции $r(I_p, I_{p,f})$ между наблюдаемым I_p и расчетным $I_{p,f}$ значениями потоков протонов по параметрам всплесков, а также регрессионные коэффициенты a и b в уравнении (1) монотонно увеличиваются по мере увеличения частоты f радиоизлучения всплеска, и достигают максимальных значений в микроволновом диапазоне.

Для более детального исследования роли декаметровой компоненты при оценке потока протонов по параметрам радиовсплесков был проведен множественный корреляционный и регрессионный анализ связи потока протонов СКЛ I_p с параметрами всплесков в микроволновом и декаметровом диапазонах в соответствии со статистической моделью вида:

$$\lg I_{p,m,dec} = a_1 \lg F_m + b_1 \lg T_m + c_1 \lg f_m + a_2 \lg F_{dec} + b_2 \lg T_{dec} + c_2 \lg f_{dec} + d. \quad (2)$$

Этот анализ показал, что коэффициенты a_1 , b_1 , c_1 , a_2 , b_2 , c_2 при параметрах всплесков в линейной регрессионной модели (2) не постоянны, а зависят от интенсивности ДКМ компоненты. Для иллюстрации на рис.1а,б показана зависимость коэффициентов a_1 и b_1 от интегрального потока (флюенса) ДКМ компоненты. Видно, что они заметно увеличиваются при увеличении потока декаметрового излучения (нормированного на предвсплесковый уровень). Существенно увеличивается также и коэффициент корреляции между наблюдаемым и расчетным значениями потока протонов СКЛ (рис.2в).



На рис.2а,б,в для сравнения показаны диаграммы рассеяния между наблюдаемым и расчетным значениями потоков протонов (а) только по параметрам μ -всплесков, (б) только по параметрам ДКМ всплесков, (в) по комплексному параметру (2) с учетом зависимости регрессионных коэффициентов от флюенса ДКМ-излучения. Совершенно очевиден значительный рост корреляции в последнем случае.

Таким образом, учет зависимости регрессионных коэффициентов от логарифма интегральной мощности ДКМ компоненты приводит к резкому увеличению точности оценки потока протонов по параметрам μ и ДКМ всплесков. Корреляция при этом увеличивается с $r \approx 0.70$ до $r \approx 0.90$, а остаточная дисперсия уменьшается с $\sigma^2 \approx 0.67$ до $\sigma^2 \approx 0.20$ (см. рис.3в). Эти параметры связи близки к предельно достижимым оценкам точности прогноза потоков протонов СКЛ по радиовсплескам, полученным в в (Мельников В. Ф. и др., КИ, 1991, 29, 95) на основе использования интенсивности электронной компоненты СКЛ как величины, характеризующей эффективность выхода ускоренных протонов в межпланетное пространство. Полученный результат указывает на то, что декаметровое излучение солнечных вспышек может служить эффективным количественным индикатором условий выхода протонов в МП.

Исаева Е.А., Мельников В.Ф., Цветков Л.И. Зависимость точности оценки потока протонов СКЛ от значения параметров радиовсплесков. – Тезисы докладов на конференции «Физика Солнца: наблюдения и теория» (НИИ КрАО, 6-12 сентября 2009г).

Исаева Е.А., Мельников В.Ф., Цветков Л.И. Повышение точности оценки потока протонов СКЛ по параметрам вспышечного радиоизлучения. – Изв. КрАО, 2009 (в печати).

1.1.10. Совершенствование методов корональной сейсмологии

Проведен детальный анализ фазовых соотношений между продольными и поперечными смещениями скорости при возбуждении в корональной петле быстрых магнитозвуковых колебаний (БМЗ) радиальных колебаний. Получены соотношения между амплитудами компонент смещений, из которых следует, что из-за фазового сдвига между продольными и поперечными смещениями условия вмороженности оснований плотных и толстых корональных петель в фотосферу нарушаются. Это свидетельствует в пользу возбуждения радиальных мод, сопровождающихся излучением МГД волн в окружающую среду. Таким образом, создать условия для возбуждения неизлучающих радиальных БМЗ мод в «толстой» вспышечной петле достаточно проблематично, поскольку сдвиг фаз между смещениями приведет к сильному оттоку энергии колебаний в плотную фотосферу. Следовательно, модель пульсаций излучения, основанная на представлениях о генерации радиальных неизлучающих БМЗ мод во вспышечной петле сталкивается с трудностями (см, например, Mathioudakis, et al., A&A, 403, 1101, 2006). С помощью методов корональной сейсмологии и солнечно-звездной аналогии исследованы квазипериодические пульсации оптического излучения вспышки на активном красном карлике EQ Peg B, обнаруженные Матиодакисом и др. (2006). Показано, что они могут быть вызваны радиальными быстрыми магнитозвуковыми колебаниями протяженной вспышечной арки. Исходя из диагностического метода, предложенного Степановым и др. (2005), по параметрам пульсаций излучения определены значения температуры (6×10^7 К), концентрации плазмы ($2.7 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и магнитного поля (540 Гс) в области вспышечного энерговыделения. Получены указания в пользу существования протяженных корон на красных карликовых звездах.

Обнаруженный в работе Mathioudakis, et al. (A&A, 403, 1101, 2006) эффект возрастания периода колебаний впервые объяснен в рамках модели возбуждения излучающих МГД колебаний корональной петли «испарением» хромосферного вещества, что привело к увеличению плотности плазмы во вспышечной петле и, соответственно, изменению периода колебаний [7,8].

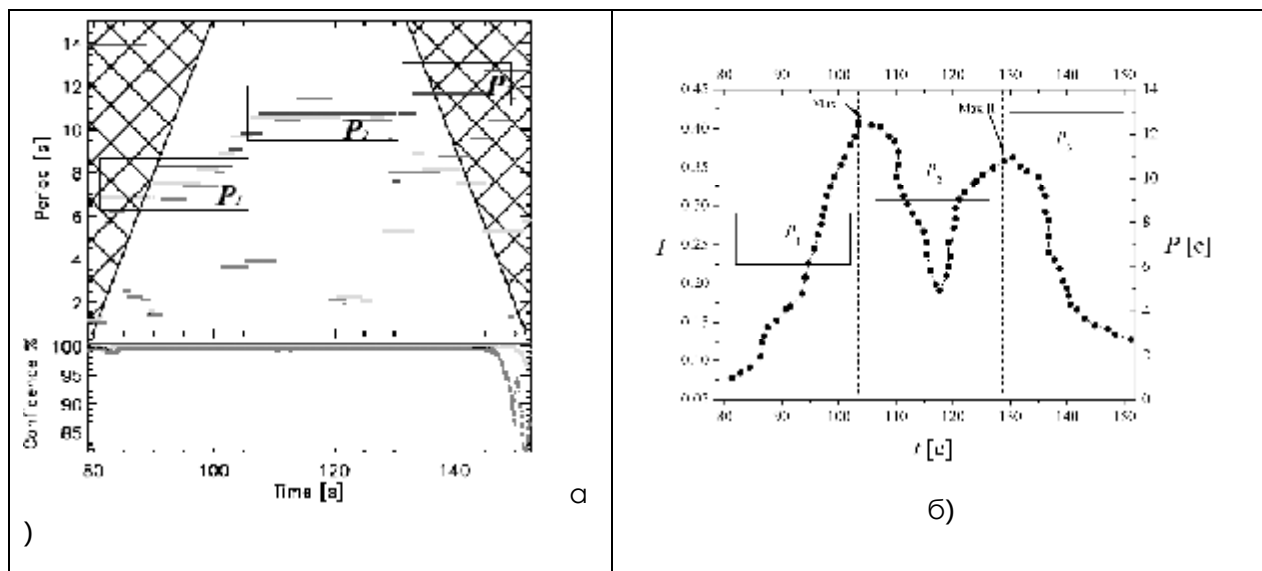


Рис.1. а) Изменение периода колебаний во времени [19]. б) Контур временного профиля оптического излучения вспышки 4 ноября 2003 г. на EQ Peg B (построенный на основе Рис.1), Max I и Max II – последовательные максимумы потока излучения. Прямоугольниками отмечены области соответствующие значениям периода P_1 , P_2 и P_3 .

Stepanov A.V., Tsap Y.T., Kopylova Y.G. Stellar flare diagnostics from multi-wavelength observations. Proc. IAU Symp. N 264. 2009 (in press).

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г., Жилев Б.Е. «Диагностика вспышки EQ Peg по пульсациям оптического излучения» (послана в Письма в Астрон. журн.)

Исследованы 12 солнечных вспышек с радиоисточниками в виде одиночных вспыхивающих петель, наблюдаемых на радиогелиографе (NoRH) и радиополяриметре (NORP) в обсерватории Нобейма (Япония). Временные ряды модуляции радиоизлучения выбранных вспышек обработаны методами вейвлет-анализа. В десяти из двенадцати вспыхивающих событий найдена как минимум одна спектральная компонента с периодом от 5 до 60 секунд. Добротность КПП низкая, со средним значением $Q \approx 25$. Показано, что в одной вспышке могут присутствовать одновременно более двух уверенно разделённых спектральных компонент с разными типами поведения во времени. Выделены четыре типа КПП: 1) с постоянным периодом порядка 15–20 с или 8–9 с (преобладающий тип), 2) со спектральным дрейфом в сторону более коротких периодов (на фазе роста всплеска), 3) со спектральным дрейфом в сторону более длинных периодов (на фазе спада всплеска), 4) с X-образным дрейфом на фазе роста всплеска.

Koupriyanova E.G., Melnikov V.F., Nakariakov V.M., K. Shibasaki K. "Types of microwave pulsations in single flaring loops" Solar Physics 2009 (in press)

1.1.11. О происхождении касп-структуры корональных арок

Проведен анализ механизмов формирования шлемовидных структур и плазмоидов над вспыхивающими петлями. Показано, что существование толстых (10^7 - 10^9 см) токовых слоев с развитой магнитогидродинамической турбулентностью выглядит проблематичным. В условиях солнечной короны мелкомасштабные турбулентные пульсации не способны деформировать магнитные силовые линии. Формирование шлемовидных структур в импульсных событиях связывается с раскачкой баллонной неустойчивости изгибными колебаниями петель. Образование плазмоидов объясняется отрывом плазменного «языка» от вершины арки вследствие пересоединения магнитных силовых линий. Показано, что модель индуцированного плазмоидом пересоединения (plasmoid-induced reconnection model) не согласуется с результатами наблюдений солнечной вспышки 15 апреля 2002 года. Колебания потоков микроволнового и жесткого рентгеновского излучения, обнаруженные по данным наблюдений NoRH, CORONAS-F хорошо укладываются в рамки предложенного вспыхивающего сценария. На основе трехжидкостного приближения рассмотрено влияние нейтральной компоненты плазмы на диссипацию магнитного поля в токовых слоях. Показано, что в случае амбиполярной диффузии из-за джоулевой диссипации, вызванной столкновениями ионов с нейтральными атомами, магнитный поток не сохраняется. В рамках модели Паркера проведен детальный анализ особенностей пересоединения магнитных силовых линий в частично ионизованной плазме. В верхней атмосфере Солнца толщины токовых слоев могут достигать сотен километров, что позволяет объяснить происхождение солнечных спикул и хромосферных джетов.

Stepanov A.V., Tsap Y.T., Kopylova Y.G. Ballooning instability: origin of cusp-shaped coronal structures and CME. Abstract book of the XXVIIth General Assembly of IAU. 2009. P.381.

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г. «Баллонная неустойчивость и «стандартная» модель солнечных вспышек», Конференция «Физика плазмы в солнечной системе» (ИКИ РАН, 17-20 февраля 2009 г.), сборник тезисов, с. 16

Степанов А.В., Цап Ю.Т. «Амбиполярная диффузия и магнитное пересоединение» Сборник трудов конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2009».

1.1.12. Анализ активных плазменных структур на Солнце по данным спектрально-поляризационных радионаблюдений

А) В ряде эруптивных событий на лимбе (2.12.2003, 31.07.2004, 25.01.2007), состоящих из выброса волокна, вспышки и СМЕ, прослежен процесс формирования пост-эруптивной аркады по данным наблюдений в микроволновом диапазоне на радиотелескопе РАТАН-600 с использованием данных в других энергетических диапазонах. Исследована зависимость развития пост-эруптивных процессов от мощности вспышки, структуры и

скорости СМЕ. Сделан вывод о том, что на ранней стадии развития активного события (30 мин – 1 час после пика вспышки) преобладает интенсивное тепловое микроволновое излучение формирующейся аркады (данные RHESSI также свидетельствуют о тепловой природе источника мягкого рентгеновского излучения на этой фазе события) На стадии затухания нестационарного явления данные радионаблюдений в микроволновом, дециметровом и метровом диапазонах волн свидетельствуют о наличии нетепловых процессов, возможно связанных с присутствием ускоренных частиц

Б) Проведён анализ квазипериодических колебаний (КПК) нескольких пятенных радиоисточников по данным радиогелиографа Нобейма, выполненных одновременно с анализом этих колебаний по оптическим наблюдениям на Саянской обсерватории по измерениям колебаний солнечной атмосферы на уровне хромосферы в линии H-alpha. Сопоставление оптических и радио наблюдений позволило продемонстрировать существование мод МГД колебаний (волн), распространяющихся от хромосферы и достигающих коронального уровня. По задержке и скорости распространения волн на уровне хромосферы сделана оценка высоты переходной области –2700 км. Метод сопоставления параллельных оптических и радионаблюдений КПК выполнен впервые.

В) Выявлены долгопериодические колебания микроволнового излучения солнечных пятен (с диаметром более 0.7 мин дуги) по одновременным наблюдениям на двух частотах на радиогелиографе в Нобейма (NoRH) и Сибирском солнечном радиотелескопе (ССРТ). Периоды колебаний – 20-150 мин, однако не исключено существование и более долгопериодных колебаний. Выявленные колебания интерпретируются как собственные колебания пятен и свидетельствуют в пользу модели “мелкого” пятна.

V.E.Abramov-Maximov, G.B.Gelfreikh, N.I.Kobanov, K.Shibasaki A comparison of parameters of 3-minute and 5-minute oscillations in sunspots from synchronous microwave and optical observations, “Universal Heliophysical Processes”, Proceedings IAU Symposium № 257, 2008, N. Gopalswamy, D Webb and K.Shibata eds., pp. 95-99

Yu.Grigorieva, L.K.Kashapova, M.A.Livshits, V.N.Borovik Microwave observations of solar eruptive events on December 2, 2003 and January 25, 2007 with the RATAN-600 radio telescope. Detection of the thermal emission source. “Universal Heliophysical Processes”, Proceedings IAU Symposium № 257, 2008, N. Gopalswamy, D Webb and K.Shibata eds., pp. 177-179.

I.A.Bakunina, V.E.Abramov-Maximov, S.V.Lesovoy, K.Shibasaki, A.A.Solov'ev, Yu.V.Tikhomirov. The long period oscillations of microwave emission of solar active regions by observations on NoRH and SSRT. “Universal Heliophysical Processes”. Proceedings IAU Symp.№ 257, 2008, N. Gopalswamy, D Webb and K.Shibata eds. pp. 155-157

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Лесовой С.В., Кардаполова Н.Н., Шибасаки К., Соловьёв А.А., Тихомиров Ю.В., Бакунин В.Л., Просовецкий Д.В. Долгопериодные колебания солнечных пятен по одновременным наблюдениям на радиогелиографе Нобейма и Сибирском Солнечном радиотелескопе. Труды ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно- земная физика – 2008", Санкт-Петербург, ГАО РАН, ред. Наговицын Ю.А., сс. 13-16.

.U.Grigorieva, V.N.Borovik, M.A.Livshits, V.E.Abramov-Maximov, L.V.Opeikina, V.M.Bogod, A.N.Korzhavin Post-eruptive arcade formation in the CME/flare limb event on January 25, 2007: microwave observations with the RATAN-600 radio telescope, Solar Phys., 2009, v.260, pp.157-175.

Григорьева И.Ю. Боровик В.Н., Кашапова Л.К. Формирование постэруптивной аркады в активном событии на лимбе 31 июля 2004г по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика - 2009", 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН .

V.E.Abramov-Maximov, G.B.Gelfreikh, N.I.Kobanov, K.Shibasaki, S.A.Chupin, Multilevel Analysis of Oscillation Motions in Active Regions of the Sun, сдано в Solar Physics.

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Соловьёв А.А. Долгопериодные колебания микроволнового излучения солнечных пятен в интенсивности и поляризации. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика - 2009", 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН .

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Соловьёв А.А., Накаряков В.М., Тихомиров Ю.В., Мельников В.Ф.,Наговицын Ю.А. Исследование колебаний микроволнового излучения Солнца с помощью радиогелиографов: проблемы, методы, результаты. Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика - 2009", 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН .

Григорьева И.Ю., Боровик В.Н., Лившиц М.А., Кашапова Л.К.. Формирование постэруптивной аркады в активном событии на лимбе 31 июля 2004г по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600. Изв КрАО, 2009.

Доклады на международных и всероссийских конференциях:

One-day Nobeyama Symposium on Solar Physics, 29 Jan 2009, NSRO, Nobeyama, Japan

George Gelfreikh. Introductory remarks on QPOs of the radio sources of the Sun.

Vladimir Abramov-Maximov. Multilevel analysis of oscillation motions in active regions of the Sun.

George Gelfreikh. QPOs of sunspot-associated radio sources and flare activity of solar active regions

European Week of Astronomy and Space Science JENAM 2009, April 20–23, 2009, Hertfordshire, London, UK

Irina Yu. Grigoryeva, Larisa K. Kashapova, Moisey A. Livshits and Valery N. Borovik "Microwave observations with the RATAN-600 radio telescope of the off-limb sources in different non-stationary solar processes" (в тезисах - стр.171)

INY-ISWI Regional Meeting, September 7-13, 2009, Sibenik, Croatia

I.Yu Grigoryeva, L.K Kashapova, M.A Livshits, V.N.Borovik "The post-eruptive arcade formation in the limb event on July 31, 2004 from microwave solar observations with the RATAN-600 radio telescope"

Конференция «Физика Солнца: наблюдения и теория», 6 – 12 сентября 2009 г. П.Научный, КрАО.

Григорьева И.Ю., Боровик В.Н., Лившиц М.А., Кашапова Л.К.. Формирование постэруптивной аркады в активном событии на лимбе 31 июля 2004г по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600.

Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 17-20 февраля 2009, ИКИ РАН.

В. Е. Абрамов-Максимов, Г.Б. Гельфрейх, Н.И. Кобанов, К. Шибасаки. Результаты и перспективы исследования квазипериодических колебаний микроволнового излучения активных областей Солнца. (в тезисах – стр. 21)

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Лесовой С.В., Шибасаки К., Соловьёв А.А., Тихомиров Ю.В., Мельников В.Ф. Неспорядические долгопериодные флуктуации микроволнового излучения солнечных пятен. (в тезисах – стр.26)

Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика - 2009", 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН

Абрамов-Максимов В.Е., Бакунина И.А., Гельфрейх Г.Б., Шибасаки К. Особенности трех- и пятиминутных колебаний микроволнового излучения активных областей Солнца по данным радиогелиографа Нобейма. (в тезисах - стр. 5)

Абрамов-Максимов В.Е., Гельфрейх Г.Б., Шибасаки К. Проявление симпатических событий на Солнце в микроволновом диапазоне. (в тезисах стр 6)

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Соловьёв А.А. Долгопериодные колебания микроволнового излучения солнечных пятен в интенсивности и поляризации.(в тезисах - стр. 12)

Бакунина И.А., Абрамов-Максимов В.Е., Соловьёв А.А., Накаряков В.М., Тихомиров Ю.В., Мельников В.Ф.,Наговицын Ю.А. Исследование колебаний микроволнового излучения Солнца с помощью радиогелиографов: проблемы, методы, результаты. (в тезисах - стр 13)

Гельфрейх Г.Б., Абрамов-Максимов В.Е., Шибасаки К. Диагностика короткопериодических волновых процессов в пятнах по колебаниям микроволнового излучения. (в тезисах - стр 34)

Григорьева И.Ю. Боровик В.Н., Кашапова Л.К. Формирование постэруптивной аркады в активном событии на лимбе 31 июля 2004г по микроволновым наблюдениям на РАТАН-600.(в тезисах - стр. 40)

1.1.13. Структура магнитного поля в нижней короне Солнца для стабильных активных областей

Ранее по многоволновым наблюдениям на радиотелескопе РАТАН-600 поляризованного радиоизлучения активных областей в микроволновом диапазоне была определена структура магнитного поля активных областей на корональных высотах. Магнитные поля напряженностью около 1000 Гаусс находятся на достаточно больших высотах в атмосфере Солнца (от 10 до 25 т.км), что хорошо подтверждается наблюдения магнитных петель в ультрафиолете, а также соответствует предыдущим радиоастрономическим измерениям магнитного поля на уровне переходной области. В некоторых случаях наблюдается винтовая структура магнитного поля.

Поскольку других прямых методов измерения коронального магнитного поля в активных областях не существует, а необходимость сравнения полученных результатов существует, то для исследованных активных областей была выполнена реконструкция структуры магнитного поля в верхней атмосфере в приближении бессилового поля.

Использовалась методика, изложенная в работах [Seehafer, 1978; Wiegelmann *et al.*, 2005], и соответствующие профили магнитного поля и структуры силовой трубки.

Решение уравнения $\text{rot}\mathbf{B} = a\mathbf{B}$ по Зихаферу рассчитывается в предположении $a = \text{const}$. Потенциальное поле соответствует $a = 0$. Решение Зихафера может быть построено только для $|a| < a_{\text{max}}$. При этом $a_{\text{max}} \ll 1$. Как показывают расчеты, структура силовых линий на интересующих нас высотах, построенных для предельно допустимых значений a , практически не отличаются от структур соответствующих потенциальному полю.

Метод реконструкции для нелинейного бессилового поля, предложенный в [Wiegelmann *et al.*, 2005], не имеет ограничений по a и более точно описывает магнитное поле, но он требует в качестве граничных условий векторную магнитограмму, которая измеряется нерегулярно и с существенными ошибками. Мы же восстанавливали магнитное поле на основании данных, полученных со спутника SOHO (инструмент MDI), но при этом в качестве начального приближения бралось магнитное поле, реконструированное по Зихаферу (откуда данные).

Сравнение пространственного распределения поляризованного радиоизлучения с фотосферной магнитограммой показало, что наиболее интенсивный источник возникает над областью с максимальной напряженностью магнитного поля на фотосфере, поэтому для сравнения с данными радиоизмерений выбиралась силовая линия, исходящая из именно из этой области на фотосфере.

В результате было показано, что направление наклона силовой трубки, полученное из радиоизмерений соответствует таковому, полученному путем реконструкции, хотя степени наклона сильно отличаются. Радиоастрономический метод приводит и к более высоким напряженностям магнитного поля на больших высотах в атмосфере активной области. Различие высот может достигать значений в 2.5 раза.

В.М. Богод, Л.В. Яснв. О сопоставлении радиоастрономических измерений высотной структуры магнитного поля с данными модельных приближений *Астрофизический бюллетень*, 2009, том 64, №4, с. 333–346.

Богод В.М., Ступишин А.Г., Яснв Л.В. Сопоставление радиоастрономических измерений магнитного поля в активных областях на Солнце с результатами его реконструкции по фотосферным полям. Тезисы докладов Всероссийской конференции по физике Солнца. 2009, с. 20.

1.1.14. Особенности поляризованного радиоизлучения активных областей на Солнце.

Важный метод радиодиагностики активных областей на корональных высотах связан с анализом особенностей спектра поляризованного излучения активных областей. Речь идет, в частности, о явлении двойной инверсии знака круговой поляризации солнечного радиоизлучения в микроволновом диапазоне волн. Это явление проявляется в излучении вспышечно-продуктивных активных областей (ВПАО) на различных стадиях развития, начиная с их предвспышечной стадии.

Нами было рассмотрено несколько механизмов, которые могли бы приводить к двойной инверсии знака поляризации по частотному спектру [Bogod, Yasnov, 2008]: линейное взаимодействие волн в области квазипоперечного магнитного поля; распространение радиоволн через область с нулевым магнитным полем; рассеяние радиоволн на волнах плазменной турбулентности; наличие волокон и магнитных ям, в которых направление магнитного поля меняет знак по направлению к наблюдателю. Такой анализ показал, что, скорее всего, двойная инверсия знака поляризации связана со сложной структурой магнитного поля в активной области.

Наблюдения активных областей на сантиметровых и дециметровых волнах, выполненные в последние годы с высоким пространственным и частотным разрешением, обнаружили ряд необычных свойств спектров радиоисточников. Мы обнаружили и провели исследование новой особенности в спектрах активных областей, а именно наличие

минимума около середины регистрируемого диапазона частот для параметра Стокса V. Выяснилось, например, что спектры, относящиеся к разным частям активной области, имеют одинаковые особенности. Это указывает на принадлежность указанной спектральной особенности ко всей активной области. Было установлено, что имеет место:

- а) уменьшение потока радиоизлучения на промежуточных частях регистрируемого частотного диапазона вплоть до смены знака поляризации и соответствующим образованием двух максимумов по краям этого диапазона;
- б) уменьшение потока поляризованного радиоизлучения происходит на тех частотах, на которых имеет место спад антенной температуры неполяризованного излучения в высокочастотной области;
- с) резкое уменьшение интенсивности поляризованного излучения в диапазоне частот около 2–4 ГГц, а в некоторых случаях наблюдается и незначительная смена знака поляризации.

Был проведен анализ указанных особенностей радиоизлучения некоторых активных областей на основе модельных расчетов петлеобразных структур. В качестве простейшего приближения была выбрана модель тора. Тепловое циклотронное излучение рассчитывалось по наиболее полным формулам Железнякова (1964, 1997) для коэффициентов поглощения и оптических толщин гирорезонансных слоев, с учетом гармоник со 2 по 5. При этом использовались две методики расчета. Первая учитывала только радиоизлучение гирорезонансных слоев, по второй проводилось численное интегрирование по всей высотной структуре атмосферы. Было показано, что результаты расчетов при использовании этих методик отличаются незначительно. При расчетах использовалось два вида распределения магнитного поля: обратно пропорционально радиальному расстоянию [как в работе 4] и по модели Такакуры [5]. В процессе расчетов выяснилось, что столь несовершенная модель активной области качественно соответствует всем особенностям наблюдаемых спектров, отмеченных ранее.

Проведение модельных расчетов, позволило определить те параметры модели, которые удовлетворяют приведенным результатам наблюдений. Чтобы соответствовать наблюдениям напряженность магнитного поля петле должно быть около 350–450 Гс. Было показано, что ширина низкочастотного максимума (Δf) зависит от толщины петли (Δh) и градиента магнитного поля в петле (B'), что дало возможность определить эти параметры в исследованных активных областях. Так параметр $\frac{B'}{B} \Delta h$ в петле на уровне сантиметрового излучения изменялся в пределах от 0.26 до 0.63.

V.M. Bogod, L.V. Yasnov. Polarization of Microwave Radio Emission of Flare-Producing Solar Active Regions. Solar Phys. 2009, 255, Issue2, p. 253–271.

Богод В.М., Яснв Л.В. Особенности поляризованного радиоизлучения активных областей на Солнце. Тезисы докладов Всероссийской конференции по физике Солнца. 2009, с.21.

T.I. Kaltman, V.M Bogod, L.V. Yasnov. Solar active regions with peculiar spectral polarization emission and its possible diagnostics. Abstract book. IHY-ISWI Regional Meeting Heliophysical phenomena and Earth's environment 7–13 September 2009, Sibenik, Croatia, 2009, p. 10.

1.1.15. Структура магнитных полей и связь между спектральным индексом распределения субрелятивистских частиц по энергиям и характером их пространственного распределения в петлеобразных структурах активных областей.

Микроволновые спектры источников корональных возмущений обладают большим диагностическим потенциалом. Однако попытки получения некоторых физических параметров области генерации излучения по микроволновому спектру не являются однозначными. Для уменьшения этой неоднозначности мы используем динамические спектры микроволнового всплеска, т. е. спектры всплеска, измеренные в различные фазы его развития.

Использовалась теория гиросинхротронного излучения субрелятивистских электронов со степенным энергетическим спектром. Магнитное поле и плотность энергичных электронов в петле аппроксимировались в виде степенной зависимости с показателем степени соответственно $2m$ и n . Необходимое предположение в этом методе – незначительное изменение структуры магнитного поля во время всплеска. Но в процессе вычислений это предположение проверяется. Формально можно выписать формулы для всех параметров всплесочной активной области, но численный эксперимент показал, что относительно устойчивыми к методу минимизации и к погрешностям измерения потока оказались только параметры m , n и d (показатель энергетического спектра электронов). В результате исследования были получены следующие результаты.

1. Предложенный метод надежно определяет степень неоднородности распределения магнитного поля m и степень неоднородности распределения быстрых частиц n .
2. Степень неоднородности распределения быстрых частиц больше степени неоднородности распределения магнитного поля: $n = 1.5 \div 5.5$, $m = 0.36 \div 0.45$.
3. Градиент магнитного поля соответствует градиенту дипольного магнитного поля на высотах в несколько тысяч километров. Магнитное поле активной области AR 10933, измеренной по данным наблюдений на РАТАН-600 [4] соответствует модели с $m = 0.38$.
4. Наблюдается заметная корреляция параметров n и d . Имеет место зависимость $n = 0.58 + 0.55d$.

Такая зависимость может быть связано со следующим. Если, например, уменьшается показатель энергетического спектра электронов d и тем самым увеличивается относительная плотность более энергичных электронов, то они имеют большую возможность (и из-за большей скорости и из-за меньшей частоты столкновений с фоновой плазмой) распространиться в более широкой области активной области, что и приводит к уменьшению параметра n .

Указанное соотношение может быть объяснено в рамках простейшей модели всплесочной петли (с постоянной фоновой плотностью электронов и постоянным магнитным полем). Интегрирование по энергиям решений уравнения Фоккера-Планка с учетом только столкновительных потерь или и с учетом диффузии, но при инжекции электронов в малом питч-угле, дает результат близкий полученному из предыдущего анализа, то есть $n \propto 0.5d$.

L.V. Yasnov, M. Karlicky. An Estimation of Spatial Variations of Magnetic Field and Superthermal Electron Distribution in cm-Radio Burst Source. 2009, *Solar Phys.* DOI 10.1007/s11207-009-9453-3.

Yasnov L.V., Karlicky M. On Spatial Variations of Magnetic Field and Superthermal Electron Distribution in cm-Radio Burst Source. Тезисы докладов Всероссийской конференции по физике Солнца. 2009, с. 143.

L.V. Yasnov, M. Karlicky. Relation between the spatial distribution and spectral index of superthermal electrons in solar cm-radio burst sources. 2009, *Astroph. Journal Letters*, представлено в печать.

В.М. Богод, Л.В. Яснoв. О сопоставлении радиоастрономических измерений высотной структуры магнитного поля с данными модельных приближений *Астрофизический бюллетень*, 2009, том 64, №4, с. 333–346

1.1.16 Исследования структуры и динамики магнитного поля Солнца, его изменения от цикла к циклу и в особенности в текущий период аномально низкой активности.

Анализ проводился на базе данных, полученных при измерениях фотосферного магнитного поля (МП) с 1976 до настоящего времени в течение 33 лет в США на Вилкоккс обсерватории.

Были получены следующие результаты.

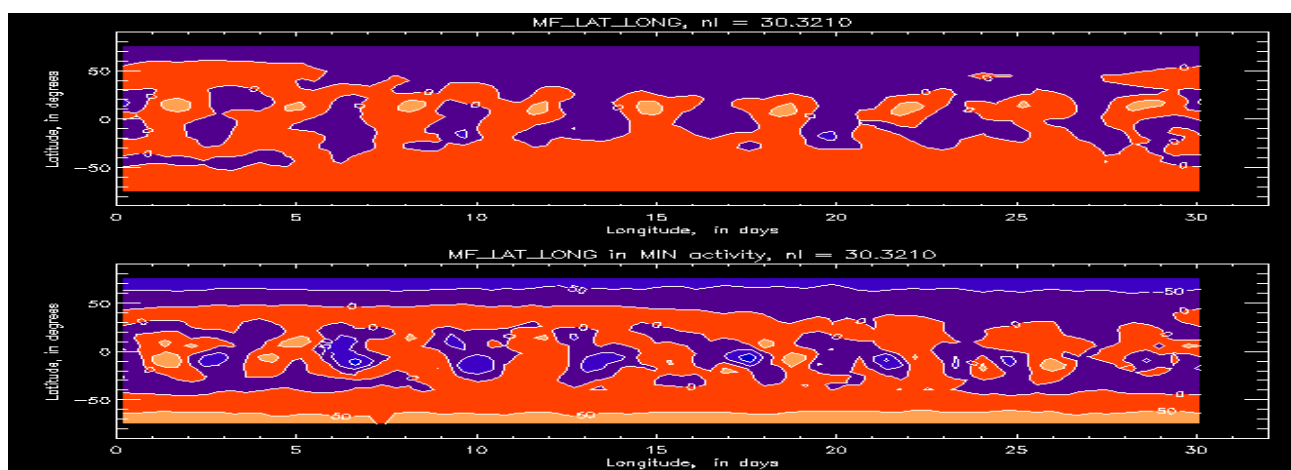
1. Из сопоставления скорости дифференциального вращения Солнца на разной глубине с долготной структурой, восстановленной в системах координат, вращающихся с различными скоростями, установлена глубина, на которой генерируются "активные долготы", то есть в тахоклинной зоне на дне конвективной оболочки.
2. Сравнив скорость дрейфа "бегущих волн" магнитного поля со скоростью дрейфа плазмы по широте, установлено их полнейшее совпадение по направлению дрейфа и его скорости.

3. Изучив связь глубины залегания активности Солнца с зависимостью скорости вращения от радиуса, приходим к заключению, что крупномасштабная 4-х зонная структура МП генерируется в слое 0.7-0.73 R Sun, а "бегущие волны" МП – в подфотосферном слое.
4. Найдена ярко выраженная связь дифференциального вращения МП как функции радиуса и широты с циклами солнечной активности.
5. Исследована связь топологии магнитного поля и временной вариации скорости счета потоков нейтрино в различных экспериментах.
6. Изучена широтная топология МП в текущем периоде аномального минимума солнечной активности (АМИН).
7. Обнаружено присутствие долготной структуры МП в настоящее время АМИН, когда практически отсутствуют концентрированные сгустки МП в виде солнечных пятен. Это подтверждает глобальный характер природы долготной структуры.

На рисунке изображена структура магнитного поля как функция долготы и широты, средняя за 33 года, соответствующих 21, 22 и 23 циклам, и за интервал низкой активности АМИН.

Предложено простое физическое объяснение возможной причины образования долготной структуры МП, связанное с реально существующим дифференциальным по глубине и широте вращением магнитного поля Солнца.

Результаты были доложены на различных конференциях и представлены для опубликования в научных журналах.



Структура магнитного поля как функция долготы (оборот выражен в днях) и широты (в градусах) средняя за 33 года, соответствующих 21, 22 и 23 циклам (верхний рисунок) и за интервал низкой активности АМИН (нижний рисунок).

Gavryuseva, E., 2008, "Basic components of magnetic variability of the Sun", JASTP, Time varying Sun, in press.
 Gavryuseva, E., 2008, "Connections between solar wind, geomagnetic characteristics and photospheric magnetic field", JASTP, in press.

Gavryuseva, E., 2009, "Structure, Differential Rotation and Variability of the Sun from helioseismology and magnetic field study.", submitted to Solar Physics

Gavryuseva, E., 2009, "Relations between variability of solar and interplanetary magnetic fields, solar wind and geomagnetic characteristics", submitted to Solar Physics

Гаврюсева, Е., 2009, "Жизнь и смерть великого Галилея в Тоскане", представлена в сборник "Астрономия и общество", 2009

XXVII Генеральная ассамблея IAU, Бразилия

N 1207 - "Variability of the neutrino counting rate, diameter and magnetic field of the Sun" на IAU Symposium No. 264 - Solar and Stellar Variability - Impact on Earth and Planets, POSTER

N 1212 - "The origin and the models of the solar magnetic field structure" на IAU Symposium No. 264 - Solar and Stellar Variability - Impact on Earth and Planets, POSTER

N 1214 - "Perturbations in helio- and magneto-sphere ruled by solar magnetic field structure" на Joint Discussion JD16 - IHY Global Campaign - Whole Heliosphere Interval, ORAL

N 1215 - "Variability of perturbations in helio- and magneto-sphere ruled by solar magnetic field structure" на IAU Symposium No. 264 - Solar and Stellar Variability - Impact on Earth and Planets, POSTER

N 1216 - "The secrets of the birth and the death of Galileo Galilei" на Special Session SpS2 - The International Year of Astronomy 2009, POSTER

N 1217 - "Differential Rotation of the Sun from helioseismology and magnetic field study" на Joint Discussion JD11 - New Advances in Helio- and Astero-Seismology, ORAL

Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», февраль 2009 г., Москва

1) Е. Гаврюсева "Структура и динамика магнитного поля Солнца"

2) Е. Гаврюсева "Экспериментальный подход к изучению влияния топологии и динамики магнитного поля Солнца на гелио- и магнитосферу".

Conference « Synergies between solar and stellar modelling », Rome , June 2009.

1) E. Gavryuseva "The modelling of the global structure of the photospheric magnetic field"

2) E. Gavryuseva "Longitudinal structure and rotation of the solar magnetic field"

1.2. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений

1.2.1. Исследованы статистические свойства наиболее сильных солнечных и гелиосферных возмущений.

Составлена расширенная база данных, охватывающая 87 экстремальных событий с 1940 г. до настоящего времени по интенсивности рентгеновского излучения, величине потока протонов солнечных космических лучей и амплитуде геомагнитных возмущений. Указано на несовершенство стандартной пятибалльной классификации экстремальных событий и на то, что мощнейшие события по одному из этих параметров могут быть не очень мощными по другим параметрам. Это различие особенно заметно между рентгеновскими и геомагнитными событиями, что объясняется геометрическими условиями и положением источника на диске Солнца. Протонные события балла 5 до сих пор не наблюдались.

Yakovchouk, O. S.; Veselovsky, I. S.; Mursula, K., Statistical properties of the most powerful solar and heliospheric disturbances. *Advances in Space Research*, 2009, Volume 43, Issue 4, p. 634-640. DOI: 10.1016/j.asr.2008.09.025

1.2.2. Ускорение частиц и нагрев вспышечной плазмы

Впервые в предвспышечной и импульсной фазах солнечной вспышке 6 декабря 2006 года обнаружена пропорциональность температуры вспышечной плазмы логарифму интенсивности жесткого рентгеновского излучения по данным Антисовпадательной защиты спектрометра на ИНТЕГРАЛе ($E_{\gamma} \sim 80$ кэВ). Причем нетепловые процессы наблюдались на 5 мин раньше, чем начало роста интенсивности теплового излучения. Это показывает, что электроны, ответственные за жесткое рентгеновское излучение были инициатором и основным источником нагрева вспышечной плазмы, причем ускорение частиц и нагрев плазмы являются системой с положительной обратной связью. Связь между температурой и интенсивностью жесткого рентгеновского излучения исчезает после начала взрывного расширения плазмы, когда ее охлаждение становится эффективнее нагрева нетепловыми электронами. Эта пропорциональность не видна по данным RHESSI ввиду низкой чувствительности детектора. Предварительный анализ некоторых других событий подтверждает найденные закономерности.

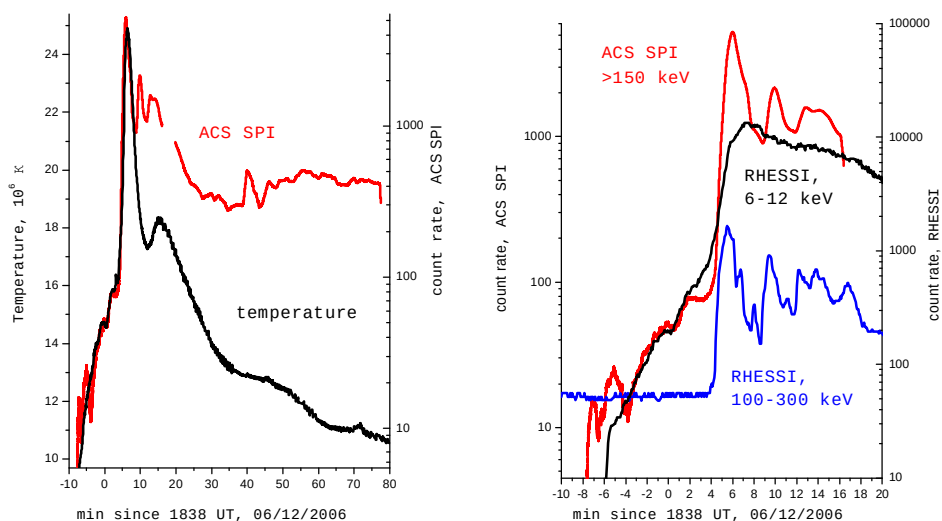


Рис. 1. Левая панель: сравнение температуры вспышечной плазмы с логарифмом интенсивности жесткого рентгеновского излучения (>150 кэВ, ACS SPI). Правая панель: Сравнение темпа счета ACS SPI и детектора RHESSI в диапазонах рентгеновского излучения 6-12 и 100-300 кэВ.

А.Б. Струминский и И.В. Зимовец, Наблюдения солнечной вспышки 6 декабря 2006: ускорение электронов и нагрев плазмы, Письма в АЖ, в печати с 26 августа 2009.

А.Б. Струминский и И.В. Зимовец, Вспышка 6 декабря 2006 как процесс с положительной обратной связью: ускорение электронов и нагрев плазмы, Конференция по солнечно-земной физике, Пулково, июль 2009.

A. Struminsky and I. Zimovets, Heating of solar flare plasma and particle acceleration, the STEREO-3/SOHO-22 Workshop "Three eyes on the Sun: Multiinstrument studies of the corona and impacts on the heliosphere" Bournemouth, England, on April 27 to May 1, 2009

A Struminsky, Relationship between plasma temperature and HXR intensity from INTEGRAL, WorkGroup 2, 9th RHESSI workshop, September 2009, Genova, Italy

A Struminsky Cross calibration with anti-coincidence system of spectrometer on integral (acs spi), WorkGroup 3, 9th RHESSI workshop, September 2009, Genova, Italy

A. Struminsky and I. Zimovets, Particle acceleration and heating of solar flare plasma, The Sun: from active to quiet, International Coronal Workshop, 19-23 October, 2009, FIAN, Moscow, Russia.

1.2.3. Наблюдения квазипериодического процесса энерговыделения в системе вспышечных петель

Солнечная вспышка 20 октября 2002 г. сопровождалась квазипериодическими пульсациями как теплового, так и нетеплового жесткого рентгеновского излучения, наблюдавшегося космическим аппаратом RHESSI в диапазоне энергий 3-50 кэВ. Анализ временных профилей темпа счета RHESSI жесткого рентгеновского излучения различных энергий, выполненный с помощью построения периодограмм Ломба, позволил выявить два статистически значимых периода колебаний: примерно 14-17 и 36-37 секунд. Пульсации с периодом 36 секунд наблюдались только у нетеплового излучения в импульсной фазе вспышки. Пульсации с периодом 16 секунд были более выражены у теплового излучения и наблюдались как в импульсной фазе, так и в фазе спада. Анализ изображений вспышечной области, определенные периоды пульсаций и оцененные физические параметры петель вспышечной области позволяют интерпретировать наблюдения в рамках идей о возбуждении быстрых МГД волн в системе взаимодействующих вспышечных петель.

Zimovets I.V., Struminsky A.B. Observations of double-periodic X-ray emission in interacting systems of solar flare loops. Solar Physics (подано в журнал 1 октября 2009).

Зимовец И.В. Наблюдения квазипериодического процесса ускорения электронов в системе взаимодействующих корональных магнитных петель в солнечной вспышке. Международная Байкальская Молодежная Научная Школа по Фундаментальной Физике (БШФФ 2009), Труды Конференции молодых ученых, 7-12 сентября 2009.

1.2.4. Области первичного энерговыведения солнечных вспышек и их связь с особенностями магнитного поля

Исследован вопрос местонахождения источников первичного энерговыведения в солнечных вспышках. В качестве локализации источников анализировались обнаруженные ранее магнитные особенности: точки самопересечения (или пересоединения) линий $F=0$. F - дифференциальный фактор, характеризующий структурного рода особенность потенциального магнитного поля. Рассмотрены 6 вспышечных событий с парными источниками нетеплового жесткого рентгеновского излучения: 17 марта 2002 г., 17 июля 2002 г., 6 апреля 2004 г., 4 ноября 2004 г., 6 ноября 2004 г. и 1 декабря 2004 г. Показано, что во всех событиях каждому наблюдавшемуся источнику нетеплового жесткого рентгеновского излучения можно сопоставить отдельную магнитную особенность. Силовая линия из этой особенности одним концом оканчивается близко (в пределах 10 arcsec) к источнику на фотосфере (в хромосфере). Для гомологических вспышек 4 и 6 ноября 2004 г. показано, что одна и та же магнитная особенность вызвала 4 ноября источник нетеплового жесткого рентгеновского излучения в восточной части вспышечной области, а 6 ноября - в западной части. Мы интерпретируем этот факт как изменение электрического поля в магнитной особенности 6 ноября на противоположное по сравнению с 4 ноября, вызванное соответствующими изменениями магнитного поля, наблюдаемыми на уровне фотосферы.

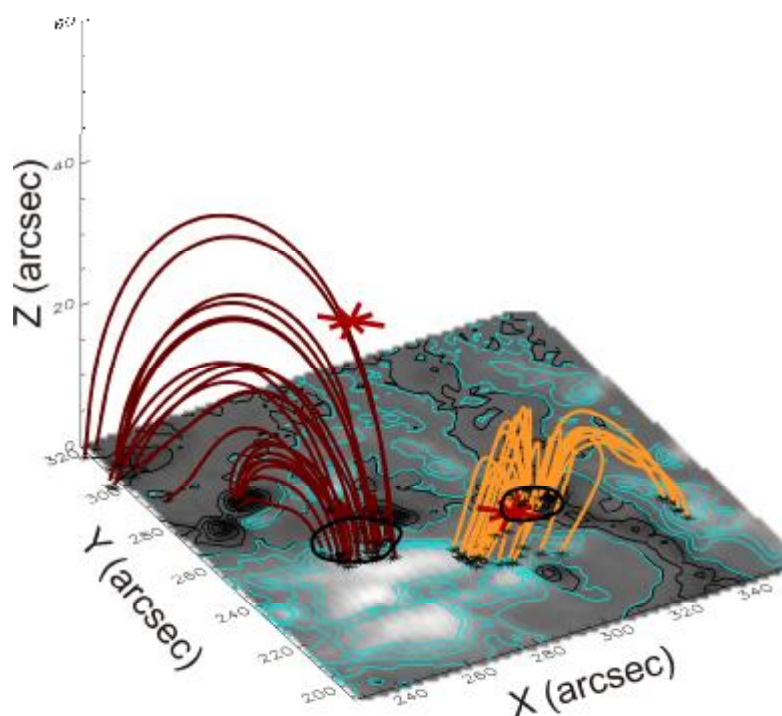


Рисунок 1. Область солнечной вспышки 17 июля 2002 г. (рентгеновский класс M 8.5). Черно-белое изображение – фотосферная магнитограмма MDI продольной по лучу зрения компоненты магнитного поля (тонкие голубые и черные контуры: +/-10, 300, 600, 900, 1200 гаусс). Два жирных, черных эллипса – парные источники нетеплового жесткого рентгеновского излучения 50-100 кэВ (RHESSI). Темно-красные и оранжевые линии – силовые линии потенциального магнитного поля, пущенные из источников жесткого рентгена. Красные звездочки – две исследуемые магнитные особенности, располагающиеся на изображенных силовых линиях.

Зимовец И.В., О.Г. Ден, Области первичного энерговыделения солнечных вспышек и их связь с особенностями магнитного поля. *Астрономический Журнал* (подано в журнал, ноябрь 2009).
O.G.Den, Zimovets I.V. Regions of the primary energy release and their relation with peculiarities of potential magnetic field in solar flares. *The Sun: from active to quiet* (International coronal workshop), 19-23 October 2009, Moscow.

1.2.5. Двухкомпонентная структура вспыхивающих электронов и ее проявления в динамических спектрах спорадического радиоизлучения Солнца.

Спектры жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек свидетельствуют о том, что электроны, ускоряемые во вспышках, имеют, как правило, две компоненты – высокотемпературную компоненту с функцией распределения, близкой к максвелловской, и более энергичную компоненту со «степенной» функцией распределения. Такая особенность функции распределения неравновесных электронов должна проявляться в «тонкой структуре» динамических спектров спорадического радиоизлучения Солнца, что представляет собой дополнительный источник информации о процессах ускорения в области солнечной вспышки. С этой целью было проведено исследование и предложена интерпретация нового типа зебра-структуры, до сих пор не описанного в литературе, а именно, зебра-структуры, появляющейся в узкополосных быстро дрейфующих оболочках, напоминающих по форме всплески III типа. Зебра-структура отсутствует на фоне континуума и "проявляется" только внутри таких быстро дрейфующих оболочек. При этом отчетливо видно, что внутри оболочки чередуются области повышенного и пониженного по отношению к фону излучения.

Идентичность всплесков III типа и оболочек, в которых появляется зебра-структура, указывает на то, что, вероятнее всего, быстро дрейфующая оболочка обязана своим происхождением распространению электронного потока в солнечной короне. При этом сам всплеск III типа, т.е. интенсивное кратковременное повышение яркости, быстро смещающееся по диапазону от высоких частот к низким, не регистрируется на динамическом спектре, но некий быстро движущийся агент (вероятнее всего, поток электронов) стимулирует появление зебра-структуры, в то время как в отсутствие потока существует только бесструктурный широкополосный континуум. Основная трудность интерпретации зебра-структуры в быстродрейфующей оболочке состоит в том, что она существует только во время прохождения потока быстрых электронов через корону, в то время как неравновесность электронов по продольным относительно магнитного поля скоростям не способствует эффективному проявлению эффекта двойного плазменного резонанса, ответственного за генерацию разрешенных гармонических полос повышенного радиоизлучения. Кроме того, прохождение потока электронов через корону должно вызвать быстродрейфующий всплеск III типа, излучение которого не наблюдается на динамическом спектре.

Предлагаемая интерпретация описанного явления состоит в следующем. Предполагается, что функция распределения электронов по поперечным и продольным относительно магнитного поля скоростям до прохождения потока состоит из следующих компонент: равновесной компоненты, распределения с конусом потерь, ответственного за генерацию континуума, и распределения типа ринга, генерирующего зебра-структуру. Если конусная компонента является более плотной и холодной, чем ринг, то зебра может быть подавлена более интенсивным континуумом и отсутствовать на динамическом спектре. При прохождении потока быстрых электронов конус потерь заполняется, генерация континуума срывается, и на фоне возникающего всплеска в поглощении может проступить зебра-структура, поскольку на распределение типа ринга прохождение потока не оказывает влияния.

Предложенная схема может быть реализована при определенных ограничениях на параметры неравновесных электронов и корональной плазмы. В ходе выполнения работы сформулированы специфические требования к параметрам электронов и физическим условиям в области генерации, выполнение которых обеспечивает появление на спектре зебра-структуры в быстродрейфующей оболочке.

Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H., Mann G. A Special Radio Spectral Fine Structure Used for Plasma Diagnostics in Coronal Magnetic Traps // Solar Physics. 2009. V. 255. P.273-288.

Zlotnik E.Ya. Origin of Zebra Pattern in Type IV Solar Radio Emission // Cent. Eur. Astrophys. Bull. 2009. V.33, № 1. P.281-298.

Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H. Zebra pattern in fast drifting solar radio bursts, Abstracts of IX-th Hvar Astrophysical Colloquium "Solar Minimum Meeting", Sept 2008, Hvar, Croatia, P.27.

1.2.6. Результаты ИЗМИРАН по Проекту "Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений"

А) Анализ экстремального солнечного протонного события 20.01.2005 обострил дискуссию по давно обсуждаемой проблеме: ускоряются ли приходящие к Земле солнечные космические лучи во вспышке или в ударной волне перед быстро распространяющимся корональным выбросом? При этом одним из важных является вопрос о связи между энергетическим спектром солнечных космических лучей и параметрами, характеризующими частотный спектр вспыхивающих микроволновых всплесков. В ряде работ по материалам предшествующих циклов солнечной активности было показано, что такая связь существует, в частности, для протонов с энергией десятки МэВ. В данной работе представлены результаты анализа этой связи по данным 1987–2008 гг. Установлено, что для событий, связанных со вспышками на западной половине диска, имеет место существенная корреляция между индексом $\delta = \lg(J_{10}/J_{100})$ (J_{10} и J_{100} – пиковые величины потока протонов у Земли с энергией $E > 10$ и 100 МэВ), эквивалентным показателю степенного интегрального энергетического спектра протонов, и такими параметрами радиовсплесков, как отношение пиковых потоков S на двух частотах (например, 9 и 15 ГГц) и частота спектрального максимума fm . Микроволновым всплескам с жестким частотным спектром (у которых $S_9/S_{15} \leq 1$, $fm \geq 15$ ГГц) соответствуют потоки протонов с жестким (пологим) энергетическим спектром ($\delta \leq 1.5$). Вспышки же с мягким радиоспектром ($S_9/S_{15} \geq 1.5$, $fm \leq 5$ ГГц), наоборот, приводят к потокам протонов с мягким (крутым) энергетическим спектром ($\delta \geq 1.5-2$). Показано также, что мощные высокочастотные всплески с наиболее жестким радиоспектром ($fm \approx 30$ ГГц) могут служить информативным индикатором ускорения значительных потоков протонов во вспышках, происходящих в сильных магнитных полях. Эти результаты являются важным аргументом в пользу предположения, что частицы солнечных космических лучей (по крайней мере, их начального импульса), в основном, ускоряются непосредственно во вспышке в процессах импульсного и постэруптивного энерговыделения, а не в ударной волне на фронте коронального выброса.

Б) Проведена подготовительная работа и получены первые положительные результаты по сопоставлению интенсивности геомагнитных бурь с количественными параметрами ультрафиолетовых диммингов и аркад, возникающих в процессе крупномасштабных солнечных эрупций (корональных выбросов массы, КВМ). Разработана и опробована IDL программа, позволяющая по данным SOHO/EIT в канале 195 Å определять локализацию, площади и объемы (потоки) диммингов, предэруптивных и постэруптивных аркад, а по магнитограммам SOHO/MDI рассчитывать фотосферные магнитные потоки, соответствующие этим образованиям. Такие расчеты выполнены примерно для 70 событий 23-его цикла, в которых геомагнитные бури с амплитудой $|Dst| > 100$ нТл надежно отождествлены с их источниками на Солнце. По этим материалам

предварительно установлено, в частности, что даже без учета магнитных характеристик солнечных эрупций имеет место заметная статистическая связь между площадью и объемом диммингов и аркад, с одной стороны, и амплитудой геомагнитных бурь – с другой. Дальнейшая работа будет направлена на включение в анализ магнитных параметров эрупций, с которыми связано наличие отрицательной B_z компоненты в соответствующих межпланетных магнитных структурах (в том числе магнитных облаках), вызывающих сильные геомагнитные бури. Будут использованы различные корональные магнитные параметры в пределах диммингов и аркад, рассчитанные для разных высот на основе экстраполяции фотосферных полей, наблюдаемых на фотосфере. Это должно улучшить статистическую связь интенсивности геомагнитных бурь с количественными характеристиками ультрафиолетовых диммингов и аркад.

В) Проанализирована связь отклонений стримеров от радиального направления с положением нулевых особых точек глобального магнитного поля Солнца. Корональные стримеры часто имеют в меридиональной плоскости кривизну, направление которой зависит от фазы солнечного цикла. Очевидно, что такая кривизна должна быть связана со структурой глобального магнитного поля Солнца, которая меняется в ходе цикла. В конфигурации, типичной для эпохи минимума активности, нулевая точка (линия) расположена на экваторе и нулевые линии радиального поля $B_r = 0$ отклоняются по направлению к ней. В эпоху максимума главные нулевые точки располагаются на оси вращения Солнца. Вероятно, в максимуме существуют и другие нулевые точки, так как структура поля очень сложная, но полярные точки отражают наиболее общую топологию, которая сохраняется при усреднении по множеству оборотов Солнца. Именно прохождение нулевых точек через полярную фотосферу знаменует переполюсовку глобального магнитного поля. Отклонение нейтральных поверхностей к этим точкам обуславливает отклонение стримеров в сторону полюсов. Структура глобального поля определяет не только геометрию таких квазистационарных структур как стримеры, но и динамику эруптивных протуберанцев и корональных выбросов. Некоторые эруптивные протуберанцы поднимаются не вертикально вверх (то есть радиально) над местом своего первоначального расположения, а движутся под значительными углами к радиальному направлению. В результате корональные выбросы оказываются на совершенно других широтах и долготах, чем зафиксированная вспышка. Знание траекторий выбросов в короне важно для оценки геоэффективности выбросов и проблем космической погоды.

Г) Исследовались топологические свойства магнитного поля возможных областей первичного энерговыделения в солнечных вспышках. Рассмотрены 6 вспышечных событий умеренной мощности, не выше класса М, с парными источниками нетеплового жесткого рентгеновского излучения: 17 марта 2002 г., 17 июля 2002 г., 6 апреля 2004 г., 4 ноября 2004 г., 6 ноября 2004 г. и 1 декабря 2004 г. На примере этих 6 новых событий подтвержден ранее полученный вывод о том, что места первичного энерговыделения в солнечных вспышках достаточно хорошо соответствуют особым точкам поверхности $F = 0$, характеризующей топологические свойства поля в перпендикулярной силовой линии плоскости. Показано, что во всех событиях каждому наблюдавшемуся источнику нетеплового жесткого рентгеновского излучения можно сопоставить отдельную магнитную особенность: силовая линия из этой особенности одним концом оканчивается близко к источнику на фотосфере.

Д) По данным КА, работающих на орбитах около Марса (КА Марс-Одиссей – аппаратура ИКИ РАН) и около Земли, проанализированы эруптивные события в группе пятен 10786 в июле 2005 г., и показано, что в центрах с многочисленными очагами вспышечной активности наиболее наглядно проявляются две стороны мощных вспышек – слабый

корональный выброс (и медленное начало слабой вспышки), которые провоцируют последующее мощное импульсное энерговыделение.

Е) Впервые методами вэйвлет-анализа были исследованы четыре больших протонных события (Ground Level Enhancements, or GLEs), в которых регистрировались релятивистские СКЛ (23 февраля 1956 г., 14 июля 2000 г., 28 октября 2003 г. и 20 января 2005 г.). В поведении интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) перед указанными GLEs обнаружен ряд пульсаций, которые можно считать предвестниками генерации будущих протонных событий (прихода энергичных солнечных протонов). Кроме того, по предварительным оценкам, в диапазоне периодов порядка суток выявлены аналогичные пульсации в поведении числа солнечных пятен (SS) и коронального индекса (CI). Подобное совпадение может свидетельствовать о синхронизации подфотосферных и корональных процессов, ответственных за генерацию СКЛ. Иными словами, ускорение СКЛ может быть не локальным явлением, но способно вовлекать обширные области в атмосфере Солнца (протяженные корональные структуры). Отдельный анализ частоты GLEs для всех 70 событий, зарегистрированных за весь период наблюдений (1942-2006), также выявил ряд пульсаций, представляющих интерес для понимания эволюции глобального и локальных магнитных полей Солнца в 11- и 22-летнем солнечных циклах.

Ж) По методу НИИЯФ МГУ (SINP code) проведены модельные расчеты временного хода скорости счёта гамма-квантов в линии 2.223 МэВ для экстремального солнечного события (GLE) 20 января 2005 г. Для сравнения расчетов с наблюдениями использовались данные о временных профилях скорости счета гамма-излучения с энергией 2.223 МэВ, а также в диапазоне энергий 4-7 МэВ (данные были получены аппаратурой АВС-Ф с детектора СОНГ-Д на борту спутника КОРОНАС-Ф). Показано, что для построения непротиворечивой картины генерации гамма-излучения с энергией 2.223 МэВ в событии 20 января 2005 г. необходимо допустить повышенное содержание изотопа ^3He в области вспышки относительно водорода ^1H . Отношение $^3\text{He}/^1\text{H}$ должно быть не менее 1.1×10^{-4} (обычно его принимают равным 2×10^{-5}). Этот результат согласуется с аналогичными оценками, полученными ранее для данной вспышки из анализа других излучений.

З) По данным наземных, стратосферных и спутниковых наблюдений был выполнен модельный анализ 32 больших GLEs из общего числа 70 наземных возрастных СКЛ, зарегистрированных за период 1956—2006 гг. Наблюдаемые спектры релятивистских протонов в таких событиях указывают на множественность и многоступенчатость (иерархию) ускорительных механизмов на Солнце. В указанных событиях можно выделить две релятивистские компоненты СКЛ – быструю (БК) и задержанную (ЗК). В рамках развиваемой нами модели двух источников генерации СКЛ показано, что в релятивистской области энергий на Солнце действуют два основных ускорительных механизма – ускорение в нейтральном токовом слое (для БК) и стохастическое ускорение (для ЗК), связанное с расширяющейся магнитной петлей. Исследуемые во многих работах так называемые «первые частицы СКЛ» принадлежат, в рамках нашего подхода, быстрой компоненте. Этот вывод был недавно подтверждён прямыми измерениями на мюонном годоскопе «УРАГАН» (МИФИ) при регистрации коллимированного потока релятивистских протонов от вспышки 13 декабря 2006 г.

И) Проведен критический анализ альтернативного подхода – описания спектров СКЛ на основе модели ускорения частиц ударной волной (УВ), генерируемой выбросом коронального вещества (СМЕ). Показано, что эта модель пригодна в основном для описания спектров в нерелятивистской области энергий. Существующие модели ускорения на ударной волне не в состоянии удовлетворительно объяснить характеристики быстрой компоненты СКЛ. Однако связь между ускорением частиц во вспышках, выбросом СМЕ и генерацией УВ представляется вполне естественной в рамках общего сценария крупного возмущения в солнечной атмосфере. В

частности, частицы, ускоренные на УВ, могут давать частичный вклад в задержанную компоненту СКЛ.

К) В литературе продолжается спорная дискуссия о природе зебра-структуры в радиовсплесках IV типа. Только за последние 5 лет вышло около 10 работ по усовершенствованию механизма, основанного на двойном плазменном резонансе (ДПР), поскольку в первоначальном виде он не отвечал многим параметрам зебра-структуры (ЗС). В кратком критическом обзоре Zlotnik, 2009 (*Cent. Eur. Astrophys. Bull.* **33**, 281-298) указывается на основную ошибку многих авторов в расчетах инкрементов плазменных волн на верхней гибридной частоте: нельзя расширять расчеты на соседние с гибридной полосой области, поскольку дисперсионное уравнение справедливо только внутри гибридной полосы. Однако сравнение механизма ДПР с другими моделями содержит ряд неточностей. Поэтому был подготовлен обзор всех новых наблюдательных данных с последующим анализом возможностей всех последних теоретических моделей ЗС. Показано, что усовершенствованная модель механизма на ДПР со степенной функцией распределения внутри конуса потерь оказывается неосуществимой в любых моделях корональной плазмы. Модель на вистлерах объясняет многие особенности ЗС, необъясненные в других моделях: в частности, сверхтонкую спайковую структуру полос ЗС, зигзагообразный частотный дрейф полос, синхронный с пространственным дрейфом радиоисточников. Для интерпретации явлений в дециметровом диапазоне впервые удалось определить вклад излучения электростатических плазменных волн на верхней гибридной частоте на уровнях двойного плазменного резонанса (ДПР) и роль вистлеров, одновременно излучаемых теми же быстрыми частицами с конусным распределением по скоростям. Тогда вистлеры служат определенным индикатором очагов низкого уровня возбуждения плазменных волн.

Анализ последних теорий позволяет заключить, что любые формы зебра-структуры могут формироваться в ходе распространения радиоволн в короне, если они встречают на своем пути неоднородности плазмы различных масштабов.

Сверхтонкую структуру полос типа «зебры» в виде миллисекундных спайков со строгим периодом ~ 30 мс можно объяснить механизмом континуального радиоизлучения в самом радиоисточнике, если предположить, что неоднородности плазмы создаются волной конечной амплитуды с таким же периодом.

Л) В микроволновом диапазоне обнаружена необычная тонкая структура, состоящая из миллисекундных всплесков (спайков) в **поглощении**, наблюдавшаяся на китайском спектрополяриметре в диапазоне 2.6 – 3.8 ГГц. Все спайки имели длительность на грани разрешения инструмента ~ 8 мс. Появление спайков в поглощении и их выстраивание вдоль траекторий III типа удастся объяснить в рамках известного механизма образования всплесков в поглощении (Zaitsev, Stepanov, *Astron. Astrophys.* **45**, 135, 1975).

Дополнительная инжекция быстрых частиц (пучки электронов небольших размеров) заполняла конус потерь (нарушая конусное распределение), и генерация континуума срывалась в эти моменты, что выражалось формированием всплесков в поглощении на фоне континуума. Поскольку максимальное излучение плазменных волн на верхней гибридной частоте имеет место при условии ДПР, то и максимальный эффект поглощения имел место на уровнях ДПР. Тем самым, объясняется появление на динамическом спектре темных спайков периодически по частоте вдоль дрейфующей траектории III типа. В моменты максимального поглощения появлялись полосы типа зебры, дрейф которых к высоким частотам можно связать с медленным опусканием магнитной петли под острым углом к уровням ДПР, а не с быстрым дрейфом радиоисточника вниз или с ростом напряженности магнитного поля.

М) Предложена новая модель ЗС. Показано, что в системе слабoreлятивистский моноскоростной поток протонов – сильно неизотермическая плазма медленная пучковая

мода может обладать отрицательной энергией и развивается взрывная неустойчивость при взаимодействии медленной и быстрой пучковых мод и ионного звука. Вследствие слабой пространственной дисперсии генерация ионного звука сопровождается каскадным процессом слияния, и происходит стабилизация взрывной неустойчивости. ЗС образуется при рассеянии быстрых протонов на ионнозвуковых гармониках. Выяснена эффективность нового механизма по сравнению с ранее обсуждаемыми гипотезами.

Н) На примере события 12.09.1999 проанализированы крупномасштабные возмущения, связанные с корональными выбросами массы (КВМ) при эрупции волокон вне активных областей. Анализ основан на H α -фильтограммах, изображениях крайнего УФ и мягкого рентгеновского диапазонов, и данных коронографов SOHO/LASCO. Показано, что хотя такие эрупции происходят в относительно слабых магнитных полях и не имеют импульсной компоненты, сопровождающие их явления могут быть даже более масштабными, чем во многих вспышечных событиях. В данном событии возмущения охватили не только структуры, прямо относящиеся к волокну, но и связанные с ними удаленные магнитные потоки. В частности, наряду с двойными диммингами, примыкающими к области эрупции, проявились и обширные и глубокие удаленные димминги. После эрупции в течение нескольких часов развивалась крупномасштабная аркада, основаниями которой были протяженные расходящиеся ленты, подобные вспышечным. Поперечные размеры аркады и расхождение лент достигали 140 тыс. км, а их длина – 520 тыс. км. В анализируемом волоконном событии по разностным изображениям обнаружена так называемая «волна EIT», характерная обычно для эруптивных вспышек. Одна компонента «волны» наблюдалась как распространяющееся над лимбом дугообразное уярчение, другая – как диффузное поярчание, медленно движущееся от области эрупции по солнечной поверхности и квазистационарное на границе близлежащей корональной дыры. Дуга «волны EIT» над лимбом в силу ее совпадения по форме, структурным деталям и кинематике с фронтом КВМ идентифицирована как автомодельно расширяющаяся фронтальная структура КВМ. В ареале события наблюдались три типа диммингов, обусловленных (а) эвакуацией плазмы, (б) нагревом плазмы и ее последующей эвакуацией, (в) поглощением излучения в системе волокон, активизированной эрупцией. Факт возникновения димминга из-за нагрева плазмы был выявлен по данным мягкого рентгеновского диапазона, но он не обнаруживается по четырем каналам EIT. Это ставит вопрос о корректности некоторых выводов, сделанных ранее только по данным EIT. Обусловленные эрупцией трансформации магнитных полей имели место также в стационарной корональной дыре, примыкавшей к ареалу события. Расширение коронального выброса массы является автомодельным и характеризуется быстро уменьшающимся ускорением, что не учитывается широко используемой полиномиальной аппроксимацией.

О) Предложен дифференциальный метод, позволяющий диагностировать нелинейные взрывные, замедленные и коллапсирующие процессы. Применение метода к данным в мягком рентгеновском диапазоне показало, что имеет место универсальное разделение длительных вспышечных всплесков на интервалы, отличающиеся разными режимами энергизации (нагрева плазмы и/или ускорения частиц) и охлаждения. Фаза роста всплеска имеет двухступенчатый характер и состоит из быстрого нагрева и медленного (по сравнению с экспоненциальным законом) нагрева. На фазе спада обнаружены интервалы быстрого, медленного и экспоненциального охлаждения. Выявлен характер нелинейности источников нагрева и охлаждения.

П) В рамках исследования возможности прогноза солнечных вспышечных явлений рассмотрены наблюдательные закономерности появления вспышечных АО и осуществления в них БСВ. Из наблюдений за ВМП можно суммировать признаки, после которых наступает рост большой вспышечной активности. Для осуществления БСВ

необходимо, чтобы новый ВМП был достаточно большим ($> 10^{13}$ Вб) и скорость его всплывания была не менее 10^9 Вб/сек. БСВ появляются через 1-2 суток после обнаружения ВМП в пределах АО. Вспышки больших и средних баллов в АО группируются в серии, кортежи. Проведенные исследования распределения БСВ за 1970-1997 показали, что в большинстве случаев они происходят в ограниченном временном интервале. Интервал времени, за который в АО осуществляется основная доля вспышек больших и средних баллов, будем называть периодом вспышечного энерговыделения (ПВЭ). В зависимости от степени развития АО, характеристик ее магнитного поля и мощности нового ВМП данный период может занимать от 16 до 80 часов, в среднем 55 ± 30 часов или 16% времени прохождения АО по диску Солнца. Очень важно отметить: в данном временном интервале происходят все БСВ данной АО, если её площадь < 1000 м.д.п.. Для того, чтобы в такой АО произошла другая серия больших вспышек, необходимо всплывание нового магнитного потока. В группах пятен, площадь которых превышает 1000 м.д.п., во время ПВЭ реализуется до 80% больших вспышек, затем наступает период затишья (~ 5 суток), после которого наступает второй ПВЭ такой же длительности (примерно 55 час), во время которого осуществляются остальные большие вспышки.

Р) Современные возможности наблюдений за солнечными вспышечными событиями резко возросли во время последнего 23 цикла СА. Наземные и орбитальные приборы расширили диапазон наблюдений и их временное разрешение. Подробные сведения о выбросах коронального вещества на двух коронографах SOHO позволило увеличить число наблюдений солнечных вспышечных событий включающих полный временной ряд и достаточное количество длин волн, чтобы судить об источнике выброса коронального вещества в данном вспышечном событии. Появилась возможность четко разделить ВКВ от вспышек, выбросов солнечных волокон и залимбовых событий. Поэтому, в рамках исследования солнечных вспышечных событий, был создан Каталог солнечных вспышек 23 цикла, который размещен на странице Московского отделения Мирового центра данных по солнечно-земной физике (http://www.wdcb.ru/index_ru/). Структура каталога содержит данные обо всех вспышках рентгеновского балла $\geq M1$ за все время развития последнего цикла солнечной активности (1996 – 2007 г.). В нем приведены временные характеристики вспышек, их локализация на видимом диске Солнца, данные об динамических радио всплесках, выбросах коронального вещества и максимальных энергиях жесткого рентгена сопровождающих данную вспышку. Данные о ВКВ позволили восстановить координаты вспышек, когда не было На-патруля, уточнить локализацию вспышки именно в данной активной области.

Чертюк И.М., В. В. Гречнев, А.М.Уралов. Крупномасштабные явления на Солнце, связанные с эрупцией волокон вне активных областей: событие 12.09.1999. *Астрономический журн.*, т. 86, № 4, стр. 392–405, 2009.

С.А. Богачёв, В.В. Гречнев, С. В. Кузин, В.А. Слемзин, О.И. Бугаенко, И.М. Чертюк. Об обработке и анализе данных КОРОНАС-Ф/СПИРИТ и других солнечных экспериментов. *Астрономический вестник*, т. 43, №2, с. 152–159, 2009.

Чертюк И.М., В.В. Гречнев, Н.С. Мешалкина. О соотношении спектров микроволновых спектров на Солнце и потоков протонов у Земли. *Астрономический журн.*, т. 86, № 11, стр. 1133–1144, 2009.

Чернетский В.А., Лившиц М.А., Кашапова Л.К., Митрофанов, И.Г., Головин Д., Козырев А.С., Литвак М.Л., Санин А.Б., Третьяков В.И., Бойнтон В., Шиохара К., Хамара Д., Наблюдения рентгеновских вспышек 14 июля 2005 года с марсианской и околоземной орбит...«Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика – 2009», Санкт-Петербург, ГАО РАН, стр. 451-454.

E.V. Troitskaia, I.V. Arkhangelskaja, L.I. Miroshnichenko, and A.I. Arkhangelsky. Study of the 28 October 2003 and 20 January 2005 solar flares by means of 2.223 MeV gamma-emission line. In: H. Mavromichalaki and A. Papaioannou (eds.) *Proc. International Symposium SEE 2007: Fundamental Science and Applied Aspects*. September 24-27, 2007, Athens, Greece. National and Kapodistrian University of Athens, 2009, p.127-131.

Arkhangelskaja, A.I. Arkhangelsky, E.V. Troitskaya, and L.I. Miroshnichenko. The role of new gamma-ray observations in investigation of powerful solar flares. In: H. Mavromichalaki and A. Papaioannou (eds.) *Proc. International Symposium SEE 2007: Fundamental Science and Applied Aspects*. September 24-27, 2007, Athens, Greece. National and Kapodistrian University of Athens, 2009, p.182-186.

- Л.И. Мирошниченко, Э.В. Вашенюк, Х. Перес-Пераса. Концепция двух компонент СКЛ: Солнечные и межпланетные аспекты. – *Известия РАН, Серия физическая*, 2009, т.73, №3, с.314-317.
- E.V. Troitskaia, I.V. Arkhangelskaja, L.I. Miroshnichenko, and A.I. Arkhangelsky. Study of the 28 October 2003 and 20 January 2005 solar flares by means of 2.223 MeV gamma-emission line. – *Adv. Space Res.*, 2009, v.43, No.4, p.547-552.
- Arkhangelskaja, A.I. Arkhangelsky, E.V. Troitskaya, L.I. Miroshnichenko. The investigation of powerful solar flares characteristics by analysis of excited states of ^{12}C and various neutrons capture lines. – *Adv. Space Res.*, 2009, v.43, No.4, p.594-599.
- J. Perez-Peraza, A. Gallegos-Cruz, E.V. Vashenyuk, L.I. Miroshnichenko, and Yu.V. Balabin. Impulsive, stochastic, and shock wave acceleration of relativistic protons in large solar events of 1989 September 29, 2000 July 14, 2003 October 28, and 2005 January 20. – *Astrophys. J.*, 2009, v.695, No.2, p.865-873.
- L.I. Miroshnichenko, E.V. Vashenyuk, Yu.V. Balabin, J. Perez-Peraza and B.B. Gvozdevsky. Ground Level Enhancements of Solar Cosmic Rays (1956-2006): Study of Solar and Interplanetary Aspects (ID 1171, oral). – *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf.*, Lodz, Poland, 7-15 July 2009 (CD-ROM).
- J. Pérez-Peraza, V. M. Velasco, J. Zapotitla, E.V. Vashenyuk, and L.I. Miroshnichenko. Pulse Width Modulation Analysis of Ground Level Proton Events (ID 1411, poster). – *Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf.*, Lodz, Poland, 7-15 July 2009 (CD-ROM).
- L.I. Miroshnichenko. Solar-terrestrial relations in the 23rd cycle of solar activity. – Odessa Astronomical Calendar 2009 (Odessa, in Russian). Odessa, Astroprint, 2009, p.164-171.
- Лаптухов А.И., Чернов Г.П. К вопросу о механизмах формирования зебра-структуры в радиоизлучении Солнца, *Физика Плазмы*, 2009, 35, №2, 185-193.
- Чернов Г.П., Лаптухов А.И., Фомичев В.В., О механизмах формирования «зебра»-структуры в радиоизлучении Солнца. Труды XII Пулковской конференции "Солнечная и солнечно-земная физика - 2008", с.387-390, 2009.
- Фомичев В.В., Файнштейн С.М. Чернов Г.П., О возможной интерпретации «зебра»-структуры в солнечном радиоизлучении. *Физика Плазмы*, 35, № 12, 1114-1117, 2009.
- Биленко И.А., Ковалев В.А., О режимах нагрева во время солнечных вспышек, *Письма в АЖ*, 2009, 35, 10, с.1.

1.2.7. В 2009 году в ФИАН было продолжено исследование мощных источников солнечного ветра в солнечной короне: вспышек, выбросов корональной массы и эруптивных протуберанцев.

Было проведено определение физического состояния плазмы в этих процессах – электронной температуры, электронной и ионной плотности, а также дифференциальной меры эмиссии. В основе исследований лежит разработанный в ФИАН метод изображающей рентгеновской спектроскопии полного диска Солнца. Метод основан на регистрации изображений солнечной короны на высотах от переходного слоя до нескольких солнечных радиусов с высоким пространственным, спектральным и временным разрешением в мягком рентгеновском и вакуумном ультрафиолетовом (МР и ВУФ) диапазоне длин волн. Этот метод был реализован в созданной в ФИАН аппаратуре ТЕСИС, которая начала работу в начале 2009 года на спутнике КОРОНАС-ФОТОН.

Из-за низкой активности Солнца наблюдения были направлены в основном на регистрацию корональных выбросов масс (КВМ) различного происхождения. За время наблюдений было зарегистрировано несколько крупных эруптивных протуберанцев, наблюдавшихся в линии HeII 304 Å, соответствующей сравнительно холодной плазме с температурой 0.05 МК. Интересно отметить, что в 2009 году аппаратурой ТЕСИС было зафиксировано большое количество протуберанцев, значительно превышающее их число, наблюдавшееся во время максимума цикла активности наблюдения. В это же время наблюдалось большое количество выбросов горячей плазмы линии FeIX 171 Å, с температурой около 1 МК, при отсутствии какой-либо активности в более низких слоях солнечной атмосферы. Одно из наиболее интересных событий было зарегистрировано 12-13 мая 2009 года, когда был зарегистрирован процесс формирования КВМ на высотах около 1 радиуса Солнца. Выброс наблюдался одновременно в линии FeIX 171 Å, где имел весьма необычную форму – вид чаши, повернутый «дном» к Солнцу, и в линии HeII где наблюдался, как развитие эруптивного протуберанца. При этом наблюдалось снижение эмиссии холодной плазмы и увеличения горячей по мере развития этого явления.

Наблюдения аппаратурой ТЕСИС выбросов коронального вещества в минимуме солнечной активности позволяют сделать следующие выводы:

- большое количество протуберанцев, связано с тем, что сравнительно слабые корональные магнитные поля в период минимума активности не препятствуют холодной и плотной плазме подниматься в высокие слои солнечной атмосферы. Этим же можно объяснить и другую особенность протуберанцев - сравнительно большое время жизни, до одного солнечного оборота, что может быть связано с высокой устойчивостью их внутренней структуры в отсутствие сильных внешних магнитных полей.
- Большое количество КВМ, наблюдаемых в линиях с температурой 1МК, связано, по-видимому с пересоединениями силовых линий магнитного поля высоко в короне (на расстояниях порядка 1 радиуса).
- Комплексный характер выброса 12-13 мая 2009 года указывает, что пересоединение в высоких слоях короны вызвало формирование КВМ, который, в свою очередь, вызвал разрушение магнитной структуры протуберанца и его эрупцию

S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, I.A. Zhitnik, A.A. Pertsov, A.P. Ignatiev, A.M. Mitrofanov, V.A. Slemzin, S.V. Shestov, N.K. Sukhodrev, O.I. Bugaenko TESIS experiment on EUV imaging spectroscopy of the Sun, *Advances in Space Research*, V. 43, Issue 6, p. 1001-1006, 2009

С. В. Шестов, А. М. Урнов, С. В. Кузин, И. А. Житник, С. А. Богачев Диагностика электронной плотности плазмы структур солнечной короны по линиям ионов Fe XI – Fe XIII диапазона 176-207 Å в эксперименте СПИРИТ/КОРОНАС-Ф. Письма в АЖ, Т. 35, № 1, 50-62, 2009 (English translation: S. V. Shestov, A. M. Urnov, S. V. Kuzin, I. A. Zhitnik, S. A. Bogachev Electron Density Diagnostics for Various Plasma Structures of the Solar Corona Based on Fe XI – Fe XIII Lines in the Range 176-207 Å Measured in the SPIRIT/CORONAS-F Experiment, *Astronomy Letters*, V. 35, No 1, PP. 45-56, 2009)

С. А. Богачев, В. В. Гречнев, С. В. Кузин, В. А. Слемзин, О. И. Бугаенко, И. М. Черток. Об опыте обработки и анализа данных спутника КОРОНАС-Ф/СПИРИТ и других солнечных экспериментов, *Астрономический Вестник*, Т. 43, № 2, 152-159, 2009

С. В. Шестов, С. В. Кузин, А. М. Урнов, А. С. Ульянов, С. А. Богачев. Диагностика температуры солнечной плазмы во вспышках и активных областях по линиям спектрального диапазона 280-330 Å в эксперименте СПИРИТ/КОРОНАС-Ф. Письма в АЖ, Т. 36, № 1, 2010 в печати

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

Урнов А. М., Богачев С. А., Горяев Ф. Ф., Кузин С. В., Рева А. А., Шестов С. В. Диагностика горячих плазменных структур в солнечной короне по данным экспериментов на КА КОРОНАС. Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 17-20 февраля 2009 г., ИКИ РАН, Москва.

.S. Kuzin Experiment CORONAS-PHOTON/TESIS: First results, International workshop “The Sun: from active to quiet”, Proc. P.7, 19-23 October, 2009. Moscow

С.А. Богачев, С.В.Кузин, С.В. Шестов, О.И. Бугаенко, И.А. Житник, Ю.С. Иванов, И.П. Игнатьев, А.В. Митрофанов, С.Н. Опарин, А.А. Перцов, В.А. Слемзин, Н.К. Суходрев, М. Зыков «Информационные и технические возможности комплекса инструментов ТЕСИС/КОРОНАС-ФОТОН по исследованию Солнца в условиях минимума и максимума солнечной активности», рабочее совещания по проекту "КОРОНАС-ФОТОН" , Таруса , 22-24 апреля 2009

S.V. Shestov, S.V. Kuzin, A.M. Urnov. Temperature and Density Diagnostics of Coronal Plasma by XUV Spectroheliograph in the SPIRIT Experiment. International workshop “The Sun: from active to quiet”, Proc. P.20, 19-23 October, 2009. Moscow

.A.M. Urnov, S.V. Kuzin, S.A. Bogachev, A.A. Reva, S.V. Shestov, A.A. Solovyev, I.A. Zhitnik. Space-Time Dynamics of Hot Coronal Plasma Structures Studied in the SPIRIT Experiment, International workshop “The Sun: from active to quiet”, Proc. P. 33, 19-23 October, 2009. Moscow

A.A. Solovyev, A.M. Urnov, S.V. Kuzin, S.V. Shestov Modeling And Interpretation Of Long-Duration Flare Phenomena (“Spiders”) Observed in the SPIRIT Experiment.. International workshop “The Sun: from active to quiet”, Proc. P. 33, 19-23 October, 2009. Moscow

1.2.8. Изучение физических процессов, влияющих на формирование долговременных вариаций геомагнитных индексов

А) Изучение активности в линии CaIIK за период 1907-2002 гг., оценка влияния УФ излучения на солнечно-земные связи в 20-м столетии.

Выполнен анализ данных синоптических наблюдений на спектрогелиографах в линии CaII-K мировой сети солнечных обсерваторий. В архив включены ежедневные данные наблюдений обсерватории Kodaikanal 1907-1999, Mount Wilson 1915-1985, Sacramento Peak 1965-2002. Проведен анализ распределения площади, координат и яркости кальциевых факельных площадок, хромосферной сетки и эфемерных точек. Анализ включал процедуру калибровки изображений, основанный на учете интенсивности рассеянного света и определения характеристики фотопластинок.

Новый метод калибровки изображений позволил создать базу данных калиброванных изображений в линии CaII-K по данным нескольких обсерваторий. Уточнено поведение солнечной активности в линии кальция в период 19-го цикла активности. Показано, что ранее выполненный анализ (Foukal P., 1996, Geoph.Res.Lett., **23**, 2169) содержал ошибочные выводы о связи между активностью солнечных пятен и интенсивностью УФ излучения Солнца по данным наблюдений обсерватории Mount Wilson из-за изменения системы наблюдений в этот период. А поскольку 19-й цикл имел наибольшую амплитуду, то за всю историю наблюдений, то была уточнена зависимость между активностью пятен активностью в линии CaII-K в периодов наибольших площадей солнечных пятен.

Это позволило уточнить оценку влияния УФ излучения на климат Земли и повышение глобальной температуры.

Tlatov, A. G.; Pevtsov, A. A.; Singh, Jagdev A New Method of Calibration of Photographic Plates from Three Historic Data Sets, Solar Physics, V. 255, pp.239-251, 2009

Tlatov, A.; Pevtsov, A. A.; Singh, J. Variations of solar activity over the last 100 years using observations in CaII-K spectral line. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008, abstract #SP53B-02, 2008

Foukal, Peter; Bertello, Luca; Livingston, William C.; Pevtsov, Alexei A.; Singh, Jagdev; Tlatov, Andrey G.; Ulrich, Roger K. A Century of Solar Ca II Measurements and Their Implication for Solar UV Driving of Climate; Solar Physics, V. 255, pp. 229-238, 2009

Ermolli, I.; Solanki, S. K.; Tlatov, A. G.; Krivova, N. A.; Ulrich, R. K.; Singh, J. Comparison Among Ca II K Spectroheliogram Time Series with an Application to Solar Activity Studies, The Astrophysical Journal, V 698, pp. 1000-1009, 2009.

Б) Оценка интенсивности полярного магнитного поля по данным радионаблюдений в 23-24-х циклах полярной активности.

Проведен анализ поляризации радиоизлучения по данным радиогелиографа Nobeyama. Для уменьшения шума был использован метод усреднения изображений в течение дня. Выполнена оценка уровня круговой поляризации радиоизлучения полярных областей Солнца и проведено сравнение и данными магнитографических наблюдений. Степень поляризации радиоизлучения на волне 1,76 см на высоких широтах в минимуме 24-го цикла примерно в три раза меньше чем в минимуме 23-го цикла активности, что может свидетельствовать об относительном уменьшении напряженности полярного магнитного поля. Реконструировано широтно-временное распределение круговой поляризации радиоизлучения за период 1992-2007 гг. и выделен дрейф, обусловленный переполусовкой крупномасштабного поля Солнца.

Tlatov, A. G. Reversal of the Radio Emission Polarization in Solar Cycle; Solar Polarization 5: In Honor of Jan Stenflo ASP Conference Series, Vol. 405, proceedings of the conference held 17-21 September, 2007 at Centro Stefano Franscini--Monte Verità, Ascona, Switzerland. Edited by Svetlana V. Berdyugina, K. N. Nagendra, and Renzo Ramelli. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.445, 2009.

В) Проверка правила Гневешева-Оля для солнечной цикличности на интервале 400 лет.

Рассмотрены вопросы выполнения правила Гневашева-Оля для различных физических индексов солнечной активности. Установлено, что при некоторой модификации общепризнанных рядов правило справедливо без исключений, по крайней мере за прошлые 400 лет. Таким образом, фактически, мы можем говорить о законе Гневашева-Оля долгосрочной динамики солнечного магнитного поля.

Наговицын Ю.А., Наговицына Е.Ю., Макарова В.В. «Правило Гневашева-Оля для физических параметров солнечного магнитного поля : 400-летний интервал», Письма в Астрономический ж., 35, с.625, 2009

1.2.9. Скрученные магнитные петли в солнечной атмосфере, статика и динамика

Реализован новый подход к описанию равновесных магнитоплазменных конфигураций с трансляционной и осевой симметрией, основанный на решении обратной магнитогидростатической задачи. Если в традиционном подходе, при решении прямой магнитостатической задачи, задается зависимость газового давления от магнитного потенциала, а затем отыскивается этот магнитный потенциал, то при решении обратной задачи магнитная структура считается заданной, и по ней находится газовое давление, плотность и температура плазмы в системе с тем или иным типом симметрии. Метод применен для моделирования солнечных протуберанцев, имеющих вид горизонтально расположенных прямых волокон (трансляционная симметрия). Плотность плазмы в области конденсации, как и в реальных протуберанцах, может на два порядка превосходить корональную, а температура газа в плотной части волокна составляет менее 10^4 К. Структура магнитного поля волокна - жгутовая, продольное поле на порядок и более слабее поперечного т.е. магнитное поле протуберанца сильно скручено: шаг винта магнитной силовой линии не превышает радиуса поперечного сечения волокна. Внешнего магнитного поля для поддержания равновесия протуберанца не требуется. Полный ток вдоль оси волокна равен нулю.

В качестве примера применения нового подхода рассчитана структура протуберанца аркадного типа, предложенного в свое время Пикельнером (1971).

Соловьев А.А. Структура солнечных волокон. Протуберанцы в короне, свободной от магнитного поля // Астрономический журнал. 2010. Т. 87, №1. 93-102

Соловьев А.А., Киричек Е.А., Шаповалов В.Н. Новая постановка магнитогидростатической задачи и проблема солнечных вспышек. Труды 38-й международной студенческой конференции «Физика Космоса», 02.02-06.02.2009. Изд-во Уральского ГУ, Екатеринбург. 2009. . Стр. 331.

Соловьев А.А. Моделирование спокойных протуберанцев. Астрономические исследования в Пулкове сегодня. СПб. ГАО РАН, под ред. А.В. Степанова, 2009 г. СС.173-184.

Соловьев А.А. Новые магнитогидростатические модели солнечных протуберанцев. Труды XIII Пулковской международной конференции по физике Солнца, 6-10 июля 2009 г., СПб, Пулково, ГАО РАН, сб. «Год астрономии: Солнечная и солнечно-земная физика-2009». С. 167-172.

Соловьев А.А., Киричек Е.А., Черемных О.И., Кришталь А.Н. Модель протуберанца инверсной полярности. Там же.С. 173-174.

Соловьев А.А. Строение солнечных волокон. Байкальская Школа по Фундаментальной Физике Иркутск. 6-12 сентября 2009г. (Лекция)

1.2.10. Исследования корональных выбросов массы и характеристик корональных дыр

А) Обнаружено существование зон возмущения перед корональными выбросами массы (КВМ). Исследования показали, что при скорости корональной плазмы u ниже критической u_c , впереди КВМ существует возмущенная зона, вытянутая вдоль направления его распространения, заполненная магнитогидродинамическими колебаниями и потоками отраженных от КВМ потоков плазмы. Концентрация плазмы в возмущенной зоне плавно спадает до больших расстояний впереди КВМ. При скоростях больше критической в передней части возмущенной зоны в радиальных распределениях плотности наблюдается образование разрыва. Поскольку величина u_c близка к локальной

магнитозвуковой скорости, примерно равной альфвеновской скорости, то образование такого разрыва при превышении u_c можно отождествить с формированием ударной волны. Показано, что на расстояниях $R < 6 R_0$ (R_0 – радиус Солнца) от центра Солнца в ограниченной области вдоль направления движения СМЕ ширина ударного фронта δ_F имеет величину порядка длины свободного пробега протонов. Это означает, что на этих расстояниях механизм диссипации энергии в ударном фронте столкновительный. На расстояниях $R \geq 10 R_0$ в передней части фронта наблюдается формирование нового разрыва с шириной $\delta_F^* \ll \delta_F$. В пределах погрешности величина $\delta_F^* \approx 0.1-0.2 R_0$ не зависит от расстояния R и определяется пространственным разрешением инструмента LASCO C3. Такая трансформация профиля яркости от фронта с шириной δ_F к разрыву с шириной $\delta_F^* \ll \delta_F$ может интерпретироваться как переход от столкновительной к бесстолкновительной ударной волне.

Предложен новый, относительно простой и быстрый метод оценки истинных геометрических и кинематических параметров корональных выбросов массы по одновременным наблюдениям KBM двумя космическими аппаратами STEREO A, B. К таким параметрам относятся направление движения KBM, положение фронта KBM в зависимости от времени, а также скорость и ускорение KBM вдоль его оси и угловые размеры KBM. Метод основан на предположении, что форма KBM может быть описана одной из разновидностей так называемых «ice-cream cone» моделей. Метод тестирован для нескольких KBM, в том числе для случая, когда на одном из космических аппаратов KBM был зарегистрирован как гало KBM.

Исследованы свойства магнитного поля в корональных дырах (КД) при возникновении в них активных областей (АО). Эти свойства сопоставлены со свойствами магнитного поля в КД без АО. КД с АО и без АО были отобраны по наблюдениям Солнца в линии HeI 1083 нм, проводимым на телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории. Для расчетов магнитных полей в КД использовались магнитограммы, полученные магнитографом SOHO/MDI, а также магнитографом SOLIS в обсерватории Китт-Пик. В потенциальном приближении на нескольких высотах были рассчитаны усредненные по площади КД значения радиальной компоненты магнитной индукции B_r , ее модуля. Были построены силовые линии магнитного поля, выходящие из различных точек на фотосфере в пределах КД. Показано, что появление активной области внутри корональной дыры может существенно повлиять на свойства магнитного поля в дыре. На всех рассмотренных высотах КД с относительно большой АО характеризуется в среднем более сильными полями, чем КД без АО. Средний угол β наклона силовых линий поля к радиальному направлению приблизительно одинаковый для двух типов КД на уровне фотосферы ($\approx 60^\circ$). С ростом высоты над поверхностью Солнца в КД с АО угол β практически не меняется, а в КД без АО уменьшается до $\approx 45^\circ$. Силовые линии магнитного поля в КД без АО являются открытыми, или очень высокими петлями, замыкающимися вне КД. АО, возникающие внутри КД – биполярные или мультиполярные магнитные структуры. Они формируются замкнутыми силовыми линиями магнитного поля, которые начинаются в АО и замыкаются либо внутри АО, либо в ближайшей окрестности АО в КД. Практически отсутствует связь АО внутри КД с внешними АО, или другими местами вне КД.

Б) Изучение устойчивости лучистой зоны звезд с тороидальным магнитным полем

В рамках теории динамо предложено объяснение глобальных минимумов солнечной активности, подобных известному минимуму Маундера. Нелинейная модель динамо, в которой учитывается зависимость турбулентной диффузии от магнитного поля, показывает явление гистерезиса. В определенном интервале значений динамо-числа возможны два решения – затухающие колебания слабых полей и магнитные циклы с постоянной и большой амплитудой, устанавливающиеся в зависимости от начальных условий. Флуктуации динамо-числа приводят к переходам между этими режимами, и

расчеты показывают перемежаемость магнитных циклов относительно большой амплитуды с эпохами слабых магнитных полей. Такое поведение может служить моделью глобальных минимумов активности на Солнце.

Обнаружено явление гистерезиса в нелинейной модели динамо, в которой учитывается зависимость турбулентной диффузии от магнитного поля. В определенном интервале значений динамо-числа возможны два решения – затухающие колебания слабых полей и магнитные циклы с постоянной и большой амплитудой, устанавливающиеся в зависимости от начальных условий. Флуктуации параметра «альфа» приводят к переходам между этими режимами, и расчеты показывают перемежаемость магнитных циклов относительно большой амплитуды с эпохами слабых магнитных полей. Такое поведение может служить моделью глобальных минимумов солнечной активности, подобных известному минимуму Маундера.

Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Еселевич М.В., Кашапова Л.К. Прогноз скорости квазистационарного солнечного ветра и интенсивности вызываемых им геомагнитных возмущений. // *Космич. исслед.* Т. 47, N. 1, С. 1-20, 2009.

Еселевич В.Г., Файнштейн В.Г., Руденко Г.В., Еселевич М.В., Кашапова Л.К. // *Космич. исслед.* Т. 47, №2, с. 114–133, 2009.

Еселевич М.В., Еселевич В.Г. О формировании возмущенной зоны и ударной волны, возбуждаемых корональным выбросом массы. // *Астрон. журн.*, 2009. Т. 86. С. 196–208.

Машнич Г.П., Башкирцев В.С. и Хлыстова А.И. Структура и вариации скорости в области спокойных солнечных волокон // *Письма в Астрон. журн.*, 2009, т. 35, №4, с. 286–294.

Fainshtein V.G. Determining the full halo coronal mass ejection characteristics. // *Universal Heliophysical Processes, Proc. of the IAU Symp.*, 2009, V. 257. P. 279-281.

Fainshtein V.G. The expansion of a coronal mass ejection within LASCO field of view: some regularities. // *Proc. of the IAU Symp.*, 2009, V. 257. P. 257-263.

Fainshtein V.G. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009. V. 49, No. 7. P. 830–842.

Файнштейн В.Г., Цивилева Д.М., Кашапова Л.К. Определение геометрических и кинематических параметров корональных выбросов массы по данным космических аппаратов STEREO, Тезисы докладов Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика» (5-11 июля 2009 г.), Санкт-Петербург, с. 129.

Fainshtein V.G., Tsivileva D.V., Kashapova L.K., Determination of true geometric and kinematic parameters of coronal mass ejections with use of STEREO spacecrafts data, Abstracts Conf. Solar wind 12, 21-26 June 2009, Saint-Malo, France, p.118.

Fainshtein V.G., Tsivileva D.M., Kashapova L.K "Determination of CME parameters in 3-D space using spacecrafts STEREO data" Abstract book of IHY-ISWI Regional Meeting 7-13 September 2009, Sibenik, Croatia, p. 8.

Eselevich V.G., Eselevich M.V., Fainshtein V.G., Georgieva K., Kirov B., Rudenko G.V. "Intense magnetic field Bz component in geoeffective solar wind structures at Earth's orbit" Abstracts of IHY-ISWI Regional Meeting 7-13 September 2009, Sibenik, Croatia, p. 21.

Олемской С.В., Мордвинов А.В. «Эффект активных долгот в модуляции потока космических лучей», Геомагнетизм и аэрномия, Т. 49, №2, стр.191-198, 2009.

Rudiger G., Kitchatinov L.L., Gellert M. Magnetic pinch-type instability in stellar radiative zones. - *IAUS* 2009. V.259. P.167-176.

Kitchatinov L.L., Rudiger G. Stability of latitudinal differential rotation in stars. - *Astron. Astrophys.* 2009. V.504. P.303-307.

1.2.11. Радионаблюдения Солнца

А) Возникновение и развитие корональных транзиентов, их соотношение со вспышками и другими связанными явлениями

Отсутствие значительного прогресса в понимании возникновения и развития корональных транзиентов объясняется двумя главными причинами. Первая – дефицит детальных наблюдений: недостаточное поле зрения TRACE, низкая частота получения изображений на SOHO/EIT и SOHO/LASCO, невозможность наблюдения на коронографах LASCO на расстояниях менее солнечного радиуса (вследствие отказа в 1998 г. LASCO/C1). Вторая причина состоит в том, что традиционные методы исследования практически исчерпали свои возможности. Поэтому очередные статистические исследования наблюдаемых

характеристик корональных транзиентов, полученных этими методами, не приводят к качественному прорыву. Вдобавок к этим двум обстоятельствам дополнительные трудности сопряжены с необходимостью обработки значительных объёмов разнородной информации, в ряде случаев требующей специальных методик. Наконец, прогрессу не способствует и распространённое, но по сути нефизичное, представление о постоянстве движущей силы, определяющей расширение КВМ; снижение же ускорения рассматривается только как следствие аэродинамического торможения КВМ в солнечном ветре. В частности, представление о постоянстве движущей силы КВМ и, следовательно, постоянстве его ускорения на начальной стадии расширения приводит к значительному расхождению по времени моментов вспышек и начал корональных выбросов, определяемых с помощью линейной или квадратичной экстраполяции измерений, выполненных на коронографах.

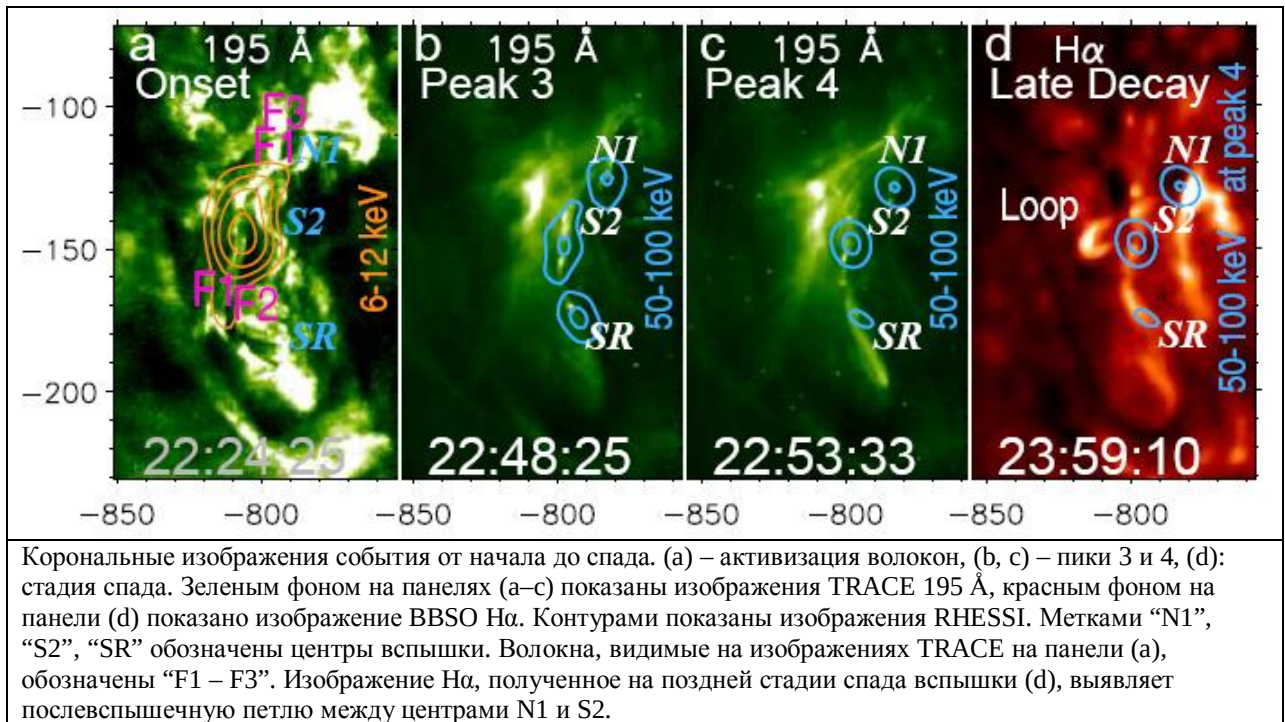
По этим причинам нами выбран иной подход. Выполняется детальный анализ нескольких отобранных событий по обширному набору данных ряда инструментов различных диапазонов излучения, обеспечивающему взаимодополняющие наблюдения. Для выбранных событий исследуются корональные выбросы на всех стадиях их развития, вспышки и другие связанные явления. Для проверки общности и уточнения полученных выводов затем анализируются более обширные выборки событий.

Различные концепции возникновения и распространения корональных выбросов проверяются по наблюдательным данным. Рассмотрены факторы, определяющие фазу импульсного ускорения выбросов, их свободное расширение, а также условия, при которых становится существенным аэродинамическое сопротивление солнечного ветра. Особое внимание уделено инициации, кинематике и конфигурации выбросов, связанных со вспышками. Обсуждаются проявления корональных волн в структуре некоторых таких выбросов. Обозначены несколько типов «волн EIT»; некоторые из них, по-видимому, связаны с реальными корональными волнами, возможно, ударными. Для нескольких событий рассматриваются их распространение, форма, соответствие радиовсплескам II типа. Корональные волны в этих событиях, скорее всего, возбуждались в нижней короне резко ускорявшимися волокнами, как импульсными поршнями внутри зарождавшихся выбросов, а затем свободно распространялись как замедляющиеся взрывные волны перед расширявшимися выбросами, образуя их внешние высокоскоростные границы. Рассмотренные наблюдения указывают, что представление о дугообразной ударной волне перед ускоряющимся поршнем, по-видимому, неприменимо к замедляющимся быстрым выбросам типа гало на умеренных расстояниях от Солнца.

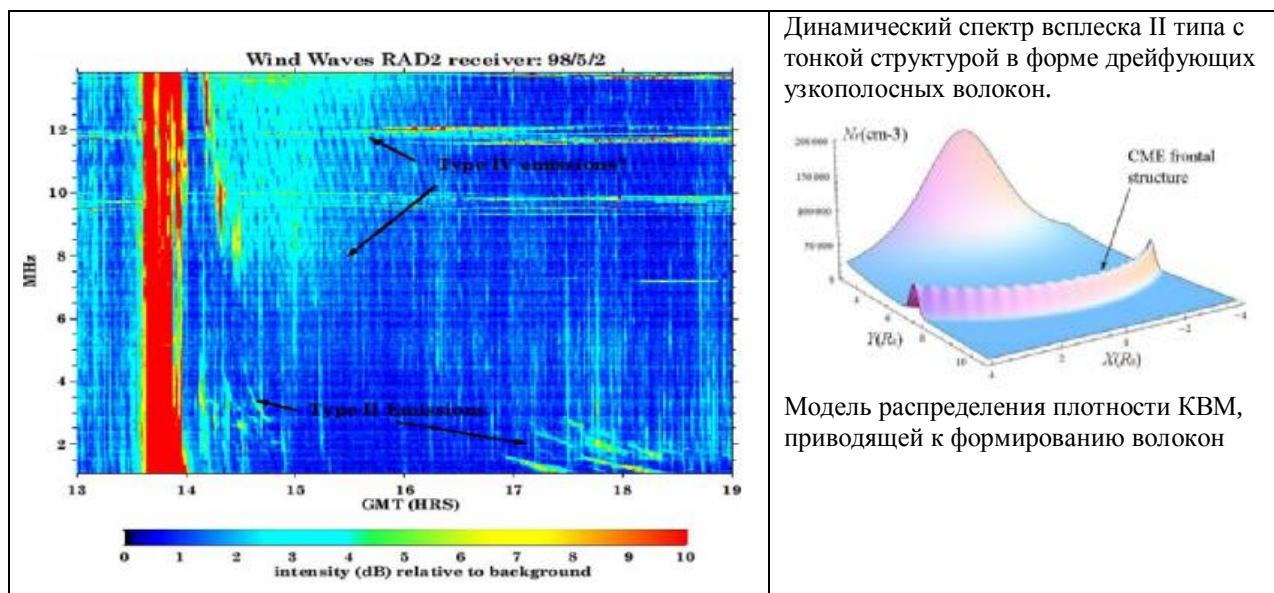
Б). Вспышечное излучение высоких энергий в жёстком рентгеновском и микроволновом диапазонах

По данным одновременных наблюдений на двух инструментах – Радиогелиографе Нобеяма (NoRH) в микроволновом излучении на 17 и 34 ГГц и Солнечном Спектроскопическом Телескопе Высоких Энергий имени Рейвена Рамати (RHESSI) в жёстком рентгеновском диапазоне – исследованы энергетические спектры ускоренных электронов для различных источников в большой вспышке 17 июня 2003г. Эта вспышка – одна из немногих, для которых возможно построить изображения источников излучения вплоть до энергий, превосходящих 200 кэВ. Более того, имеется возможность исследования спектров отдельных источников вплоть до этих энергий. Хотя это событие выглядит соответствующим стандартному сценарию с магнитным пересоединением под эруптивным волокном, ряд его особенностей не согласуется с известными моделями и имеющимися в настоящее время представлениями о вспышках. В частности, нами обнаружено: (1) микроволновое излучение может быть оптически толстым на высоких частотах, несмотря на низкую частоту максимума спектра интегрального микроволнового излучения, по-видимому, из-за неоднородности источника излучения; (2) магнитные поля в высокочастотных радиоисточниках могут быть более сильными, чем иногда

предполагается; (3) источники жёсткого рентгеновского излучения, распределённые по очень большому объёму, могут проявлять согласованные изменения их спектров, что может быть вызовом для моделей ускорения. Эти результаты подчёркивают важность исследований вспышек, происходящих в солнечных пятнах, и измерений интегральных потоков радиовсплесков в миллиметровом диапазоне.



Исследована тонкая структура солнечных дециметровых радиовсплесков II типа, проявляющихся на динамических спектрах в форме дрейфующих узкополосных волокон. Наблюдения показывают, что эти структуры регистрируются в событиях, в которых на пути распространения излучения радиовсплеска присутствует выброс корональной массы, распространяющийся в окосолнечном пространстве. Разнообразие наблюдаемой морфологии волокон и значений их параметров предполагает существование различных механизмов их формирования. Один из таких механизмов может быть связан с распространением излучения через область с относительно плотной и неоднородной плазмой выброса корональной плазмы, перед его регистрацией на Земле. Можно предположить, что волокна являются следами каустик радиоизлучения, формирующихся благодаря регулярной рефракции на крупномасштабных структурах выброса корональной массы. Для проверки этой гипотезы проведено моделирование распространения радиоволн через неоднородную плазму выброса корональной массы с учетом мелкомасштабных нетепловых флуктуаций плотности плазмы. Вычисления, основанные на методе Монте-Карло, показали, что индикатором формирования волокон в динамическом спектре из-за эффектов распространения должна быть их гармоническая структура. Вторым признаком может являться смещение частоты, на которой регистрируются волокна, и их формы на динамических спектрах при наблюдениях из удаленных точек.



3. Исследование солнечных эруптивных событий с отрицательными радиовсплесками

Исследованы солнечные события 15/16.06.2000, 01/02.06.2002, 06.02.2002 и 07.02.2002 г., которые, вероятно, относятся к малоизученному классу взрывных эрупций. В таких событиях возможно разрушение магнитной структуры эруптивного волокна и разбрасывание его фрагментов в виде облака по значительной части поверхности Солнца. Анализ изображений, полученных в крайнем ультрафиолетовом диапазоне на телескопе SOHO/EIT в каналах 195 Å и 304 Å, выявил возникновение диммингов различной формы и распространение корональной волны для 01/02.06.2002. Во всех событиях в обсерваториях в Нобейма, Лермонте и Уссурийске на ряде частот диапазона 1–10 ГГц зарегистрированы отрицательные радиовсплески, обусловленные, по всей видимости, поглощением солнечного радиоизлучения в облаке, образованном фрагментами волокна. Поглощение фонового излучения Солнца может наблюдаться как депрессия излучения в канале 304 Å. Разработана модель, позволяющая по наблюдаемому на нескольких частотах радиопоглощению оценить параметры поглощающей плазмы – температуру, оптическую толщину, площадь поглощающего облака и его высоту над хромосферой. Полученные значения температур 8000–9000 К показывают, что поглотителем являлось вещество эруптировавшего холодного волокна. Модельная оценка массы выбросов в рассматриваемых событиях составила $\sim 10^{15}$ г, что сопоставимо с массами типичных волокон и корональных выбросов массы.

Kundu M.R., Grechnev V.V., White S.M., Schmahl E.J., Meshalkina N.S., Kashapova L.K. High-Energy Emission from a Solar Flare in Hard X-rays and Microwaves, *Solar Physics*, 2009, 260, 135–156 (eprint arXiv:0908.0385).

Afanasiev A.N. Fibre structure of decametric type II radio bursts as a manifestation of emission propagation effects in a disturbed near-solar plasma, *Ann. Geophys.*, 2009, 27, 3933.

Кузьменко И.В., В.В. Гречнев, А.М. Уралов. Исследование солнечных эруптивных событий с отрицательными радиовсплесками. *Астрономический Журнал*, 2009, том 86, № 11, с. 1114–1124.

Grechnev V., A. Uralov, I. Chertok, A. Afanasyev. The Onset and Propagation of CMEs and Coronal Waves [Возникновение и распространение корональных выбросов и корональных волн (заказной доклад)]. Тезисы в кн.: The Sun: from active to quiet. International Coronal Workshop. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences. 19-23 October 2009. Moscow 2009. С. 37.

Kundu M.R., Grechnev V.V., White S.M., Schmahl E.J., Meshalkina N.S., Kashapova L.K. High-Energy Emission from a Solar Flare in Hard X-rays and Microwaves, *Solar Physics*, 2009, 260, 135–156 (eprint arXiv:0908.0385).

Кузьменко И.В., В.В. Гречнев, А.М. Уралов. Исследование солнечных эруптивных событий с отрицательными радиовсплесками. *Астрономический Журнал*, 2009, том 86, № 11, с. 1114–1124.

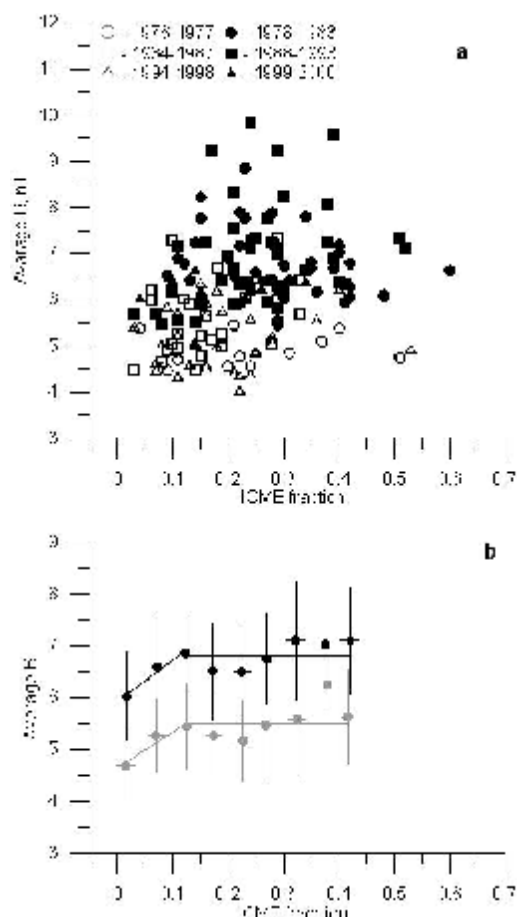
Afanasiev A.N. Fibre structure of decametric type II radio bursts as a manifestation of emission propagation effects in a disturbed near-solar plasma, *Ann. Geophys.*, 2009, 27, 3933.

2. Физические процессы в гелиосфере

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

2.1.1. Оценка магнитного поля Солнца, уносимого солнечным ветром.

Согласно некоторым модельным представлениям у Солнца существует некоторая минимальная величина магнитного потока, уносимая солнечным ветром, которая является независимой от времени константой, а весь дополнительный магнитный поток уносится исключительно выбросами корональной массы (СМЕ). Эта минимальная величина может быть оценена в минимуме солнечной активности, когда число СМЕ минимально. Мы, на основе нашего каталога крупномасштабных типов солнечного ветра в период 1976-2000 гг, оценили связь величины межпланетного магнитного поля (ММП) с долей, которую межпланетные СМЕ занимают в солнечном ветре, как в минимуме, так и в максимуме солнечного цикла. Полученные результаты показывают, что (1) эта минимальная величина ММП на орбите Земли составляет около 4,65 нТ в хорошем соответствии с предыдущими оценками, (2) наблюдаемое увеличение ММП в максимуме цикла активности не может быть объяснено повышением доли СМЕ в солнечном ветре, и должны действовать какие-то дополнительные механизмы увеличения ММП.



Yermolaev, Y. I.; Lodkina, I. G.; Nikolaeva, N. S.; Yermolaev, M. Y. The "Floor" in the Interplanetary Magnetic Field: Estimation on the Basis of Relative Duration of ICME Observations in Solar Wind During 1976 – 2000, Solar Physics, 2009, DOI: 10.1007/s11207-009-9438-2

2.1.2. Результаты ИЗМИРАН по проекту «Связь явлений в межпланетной плазме со структурой и динамикой солнечной короны»

А) Результаты наблюдений КЛ и проведенный анализ связи вариаций КЛ и СА показали, что модуляция КЛ в 23-ем цикле имеет некие отличительные особенности. Показано, что модуляцию КЛ в период длительного спада 23-го цикла СА можно описать обычной моделью, используя в качестве модулирующих параметров структурные и количественные характеристики глобального магнитного поля Солнца (т.е. наклон токового слоя и среднее магнитное поле Солнца наряду с парциальными индексами магнитного поля).

Наклон токового слоя η оставался аномально большим по сравнению с другими циклами СА в течение длительного времени (с 2004 г ($\eta > 30^\circ$) до августа 2008 ($\eta \geq 10^\circ$) и только в последнее время снизился. Такое поведение η отражается в модуляции КЛ, для которой этот индекс является одним из главных. Восстановление КЛ продолжается до сих пор (октябрь 2009 г) и интенсивность КЛ уже сейчас превышает максимумы предыдущих четырех циклов. В 23-ем цикле вклад в модуляцию от изменений η остаётся достаточно большим (~7%), что несвойственно эпохе глубокого минимума СА.

Необычность 23-его цикла во многих отношениях может быть объяснена специфическим соотношением между локальными и глобальными полями на Солнце, проявляющемся в модуляции КЛ. Циклическая вариация полного магнитного поля определяется циклическими вариациями локальных полей, которые дают свой большой вклад в индекс B_{SS} (средняя напряженность солнечного магнитного поля) и глобальным полем, которое в значительной мере определяет собой индекс ZO, особенно на поверхности источника.

Долговременная тенденция к понижению в минимумах прослеживается в изменениях величины полярного поля Солнца H_{POL} , зонально-нечетного индекса ZO и, в несколько меньшей степени, в изменениях индекса B_{SS} . Во временном ходе этих характеристик отмечается понижение их величин в минимумах СА от цикла к циклу, особенно заметное в 23-ем цикле.

При описании вариаций КЛ высокие значения наклона η , наблюдаемые в последнем цикле, компенсируются аномально низкими значениями B_{SS} , ZO и H_{POL} , что позволяет с помощью предложенной нами модели модуляции КЛ адекватно описывать наблюдаемые вариации КЛ.

Для описания модуляции КЛ рассматривается комбинация индексов глобального магнитного поля совместно со специально введенным индексом F_X , учитывающим влияние на модуляцию спорадических факторов, связанных с рентгеновскими вспышками. В предлагаемом варианте моделирования долговременных вариаций КЛ расчет вспывшечного индекса, учитывающего мощность рентгеновской вспышки и её долготное расположение, выполнен с учетом предыдущих наших результатов, но для других значений параметров (долготы и эффективного долготного размера), входящих в аналитическое описание вспывшечного индекса.

Жесткостной спектр вариаций КЛ для каждого месяца получен с использованием данных нейтронных мониторов всей мировой сети станций КЛ (1953-2008 гг.) и данных стратосферного зондирования (1957-2008 гг.). Вариации КЛ определены по данным НМ (~40 станций) с предварительной оценкой долговременной стабильности их работы и результатам стратосферных наблюдений (3 пункта). Для моделирования использованы вариации КЛ с жесткостью 10 ГВ, из которых исключены вариации, связанные с наземными возрастаниями солнечных КЛ.

Б) Совершенствовать модельное описание долговременных вариаций КЛ невозможно без учёта влияния на модуляцию КЛ областей солнечного магнитного поля с открытыми силовыми линиями, т.е. корональных дыр (КД). Однако имеется проблема получения однородного ряда площадей КД, т.е. проблема сшивания данных по КД на основе наблюдений в спектральной линии $\text{HeI } 10830 \text{ \AA}$ до 2003 г. с другими наблюдениями корональных дыр для 2004-2009 гг. Временной ряд о площадях КД в 1975-2003 гг, полученный (по непрерывным данным обсерватории Китт Пик) и использованный в

предварительных расчетах модуляции КЛ необходимо продлить до настоящего времени для анализа аномального периода спада активности в 23-ем цикле и в минимуме 24-го.

В) Продолжена работа по определению по данным мировой сети нейтронных мониторов вариаций плотности и 3-х мерной векторной анизотропии КЛ методом глобальной съемки. За отчетный период выполнены расчеты за каждый час для 2008 г. Эти данные дополнили базу данных по основным среднечасовым характеристикам КЛ, теперь она охватывает 5 циклов солнечной активности (1957-2008 годы) и является, в частности, основой для проводимого анализа межпланетных возмущений. По этим же данным рассчитаны среднечасовые и среднесуточные индексы возмущенности космических лучей для 1965-2008 гг.

Г) Продолжено составление каталога Форбуш-эффектов и крупномасштабных возмущений солнечного ветра в последних пяти циклах солнечной активности. События для 2008 г. выделены впервые, некоторые характеристики событий 1957-2007 гг. уточнены. Проводился непрерывный мониторинг возмущений КЛ и солнечного ветра на основе данных системы реального времени. Оперативно составлялся и отображался в Интернет список текущих событий 2009 г.

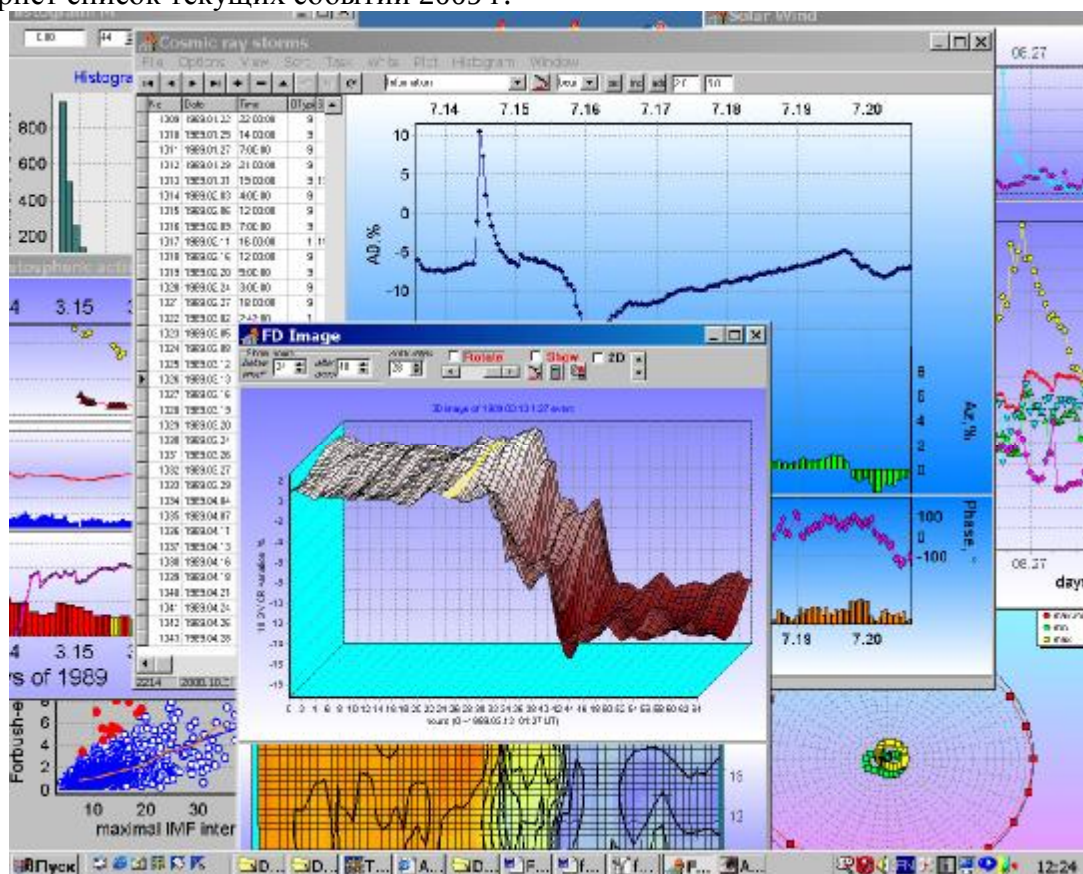


Рис. База данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений.

Исследованы события 23-го цикла солнечной активности, включавшие наземные возрастания солнечных космических лучей (GLE) и самые большие Форбуш-эффекты. Сравнение показало, что и GLE и большие Форбуш-эффекты связаны с аномально быстрыми выбросами солнечного вещества (CME) с похожими свойствами. Главное их различие в гелиодолготе – источники самых больших Форбуш-эффектов обычно находятся в центральной зоне видимого солнечного диска, а вспышки, ассоциированные с GLE, в основном, расположены в западной части диска. Показано, что ускорительная и модуляционная эффективность солнечных событий тесно взаимосвязаны. Выброс,

сопровожающийся GLE, с большой вероятностью создаёт очень большой Форбуш-эффект на орбите Земли.

Д) Показано, что средняя величина Форбуш-понижения изменяется с квази-одиннадцатилетней периодичностью, коррелируя с солнечной активностью. Так же ведут себя и количества Форбуш-понижений с различной, но достаточно большой, величиной. Эту связь можно использовать для оценок количества межпланетных возмущений и выбросов солнечного вещества (CME) в те периоды, когда не было соответствующих наблюдений.

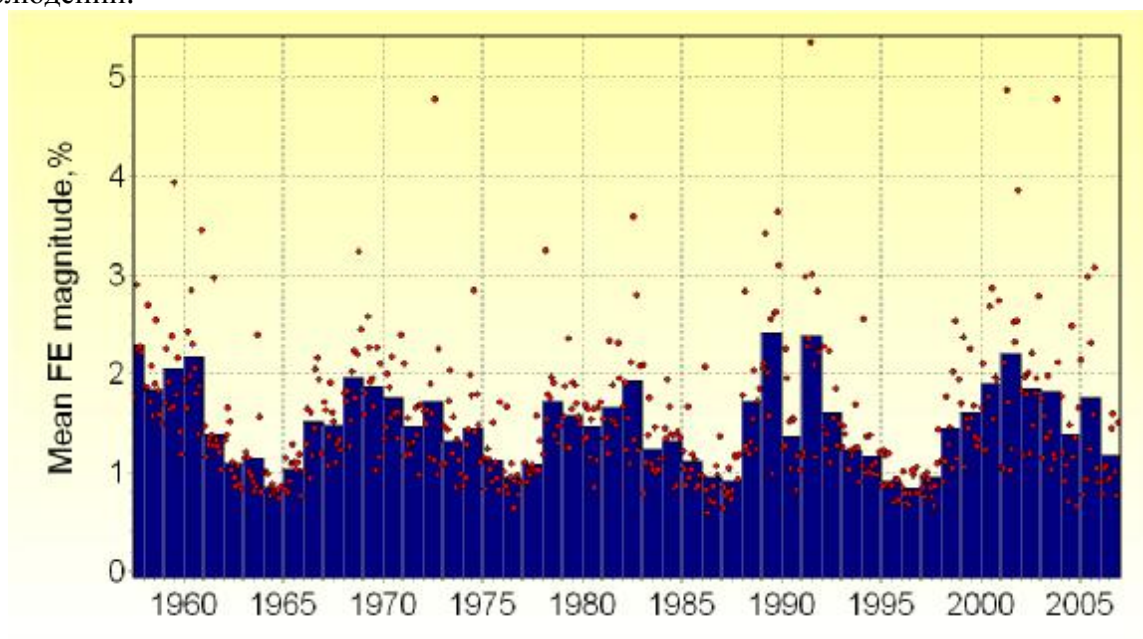


Рис. Поведение величины ФЭ, усреднённой за месяц (точки) и за год (столбики) в 1957-2006 гг.

Вместе с тем, количества больших ФЭ в различных циклах почти не коррелируют с числом солнечных пятен. В последнем 23-м цикле (скромном по числу пятен) больших Форбуш-эффектов наблюдалось больше, чем когда-нибудь ранее. Так, например, количество ФЭ с величиной $>5\%$ в 20-м цикле было всего 23. А в последнем, похожем по пятнам на 20-й, 23-м цикле их оказалось 50. Даже в исключительно активном 19-м цикле таких эффектов было меньше.

Е) По результатам, полученным методом глобальной съёмки, исследовано поведение плотности и векторной анизотропии галактических космических лучей во всех периодах с внезапными началами геомагнитных бурь (SSC) в 1957-2006.

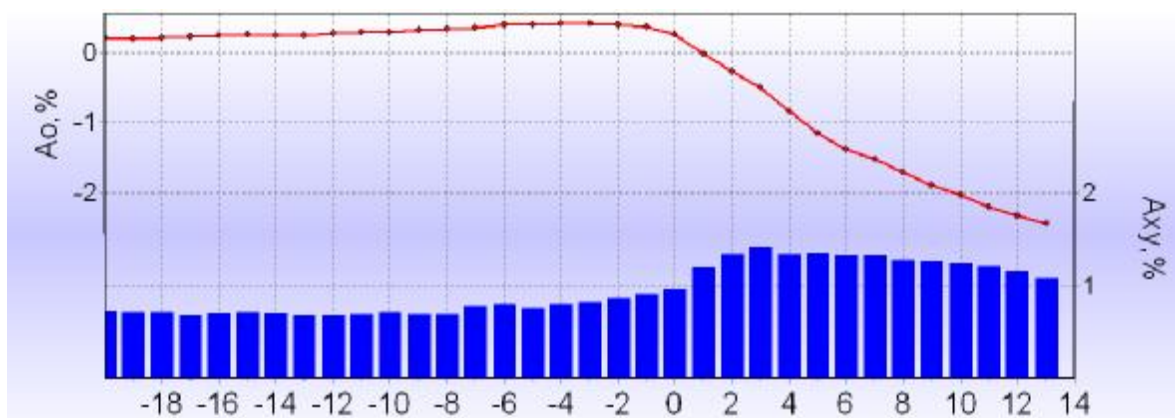


Рис. Поведение плотности и экваториальной составляющей первой гармоники анизотропии КЛ в периоды SSC, усреднённое методом наложения эпох.

Показано, что средняя анизотропия непосредственно перед SSC существенно увеличивается и её увеличение тем больше, чем больше последующее Форбуш-понижение. На усреднённых величинах анизотропии и плотности КЛ приближение ударной волны начинает сказываться приблизительно за 5 часов до её прихода. Изменения направления анизотропии (особенно для западных источников Форбуш-эффекта) можно видеть значительно раньше

Ж) Поиск предвестников магнитных бурь по данным мировой сети мюонных телескопов и нейтронных мониторов.

Показано, что перед приходом межпланетных возмущения и началом магнитных бурь меняется угловое распределение галактических КЛ и это проявляется в поведении первой гармоники анизотропии КЛ (рис.).

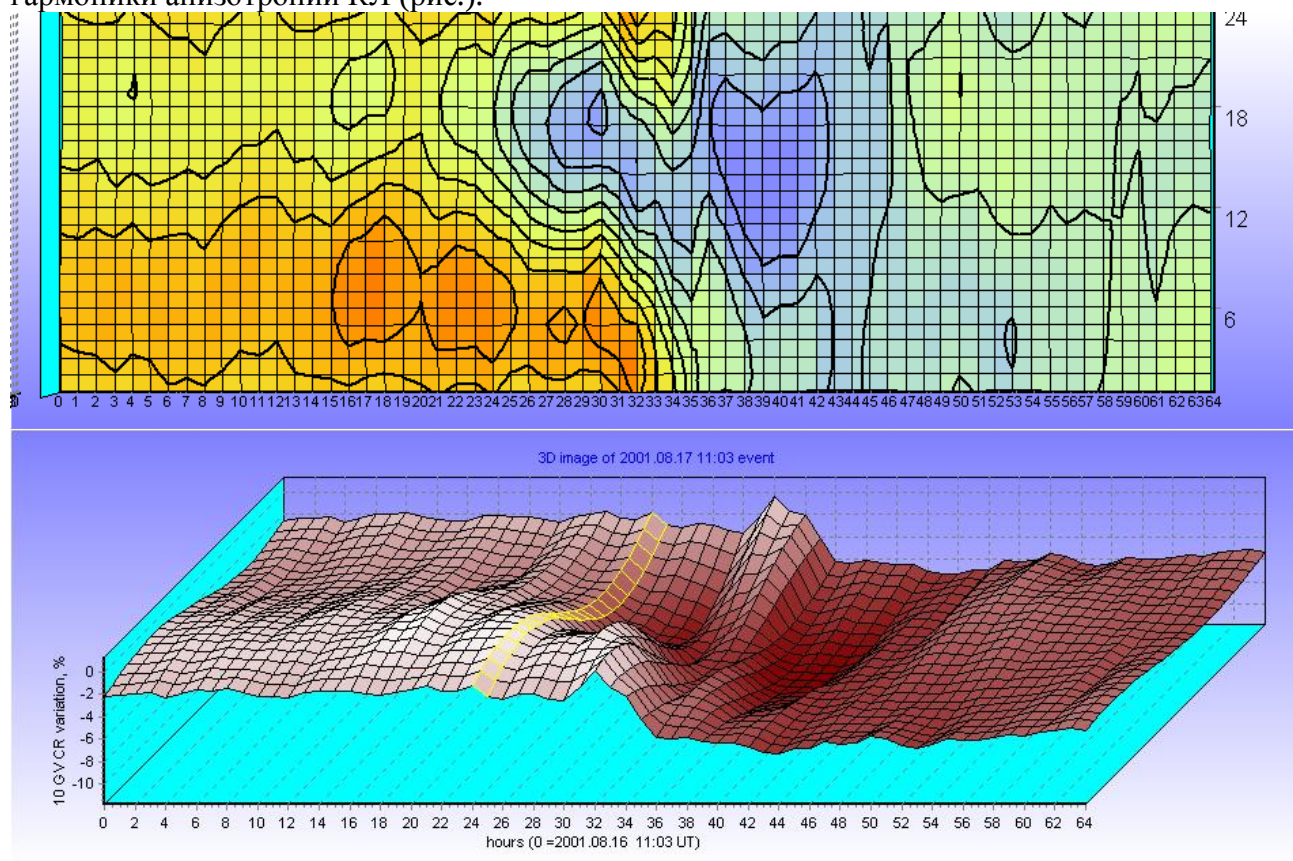


Рис. Пример изменения углового распределения интенсивности КЛ в Форбуш-понижении в августе 2001 г.

Создана и представлена в Интернете компьютерная программа, отображающая угловое распределение интенсивности КЛ, как это видно в данных сети нейтронных мониторов в произвольный период.

З) Разработан метод диагностики компонент солнечного ветра и их источников в солнечной короне. Метод основан на корреляционном анализе зависимости расположения внутренней границы трансзвуковой области R_{in} от напряженности магнитного поля $|B_R|$ на поверхности источника, $R = 2.5 R_s$. В результате установлена взаимосвязь между структурой магнитного поля на поверхности источника и ее продолжением в межпланетное пространство. Таким образом, показано, что струйная структура солнечного ветра является продолжением структуры солнечной короны. Установлен физически обоснованный критерий для определения границы эпох в цикле солнечной активности. Этот критерий связан с моментами фундаментальной перестройки структуры корреляционной зависимости $R_{in} = F(|B_R|)$

- Р. Гущина, А. Белов, В. Обридко, Б. Шельтинг. “О роли характеристик магнитных полей Солнца в долговременной модуляции галактических космических лучей”, Известия РАН, сер.физ. том 73, N 3, с. 351-353, 2009.
- Р.Т. Гущина, В.Г. Янке, “Наземный мониторинг нейтронной компоненты космических лучей на российской сети станций”, 2009, Космические лучи и гелиосфера. Тезисы докладов, представленных на Всероссийскую конференцию, посвященную 100-летию Ю.Г.Шафера, г. Якутск, С.19.
- А. Белов, А. Асипенка, Е. Дрын, Е. Ерошенко, О. Крякунова, В. Оленева, В. Янке, “Поведение векторной анизотропии космических лучей вблизи межпланетных ударных волн”. Известия РАН, сер. физ. том 73, N 3, 2009.
- В. Оленева, А. Белов, Е. Ерошенко, Е. Мавромичалаки, А. Папаиоанноу, В. Янке, “Особенности вариаций космических лучей во время Форбуш-эффектов, обусловленных далекими западными источниками”, Известия РАН, сер. физ. том 73, N 3, 2009.
- Raisa T. Gushchina, Anatoly V. Belov, Vladimir N. Obridko, Berta D. Shelting, “Galactic cosmic ray modulation in the solar activity minima”, 31th ICRC, Lodz, 2009.
- R.T. Gushchina, A.V. Belov, V.N. Obridko, B.D. Shelting, The reflection in the long-term cosmic ray modulation of the cyclic variations of integral and partial indices of the solar magnetic field. Proc. 21-st ECRS, ed. by P. Kiraly, K. Kudela, M. Steglik, A.W. Wolfendale, p. 226-231, 2009.
- Anashin V., Belov A., Eroshenko E., Krjakunova O., Mavromichalaki H., Ishutin I., Sarlanis C., Souvatsoglo G., Vashenyuk E. and Yanke V., "The ALERT signal of ground level enhancements of solar cosmic rays: physics basis, the ways of realization and development". Proc. 31th ICRC, 2009, ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc1104.pdf.
- Asipenka A., Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Papailiou M., Papaioannou A., Oleneva V., Yanke V., "Asymptotic longitudinal distribution of cosmic ray variations in real time as the method of interplanetary space diagnostic". Proc. 31th ICRC, 2009, ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc1109.pdf.
- Asipenka A., Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Mavromichalaki H., Papaioannou A., Papailiou M., Mariatos G., "Definition of cosmic ray density and anisotropy beyond the magnetosphere in real time mode" Proc. 31th ICRC, 2009, ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc1106.pdf.
- Raisa T. Gushchina, Anatoly V. Belov, Vladimir N. Obridko, Berta D. Shelting, Galactic cosmic ray modulation in the solar activity minima, Proc. 31th ICRC, 2009, ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc0582.pdf.
- Belov A., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., "Ground level enhancements of the solar cosmic rays and Forbush decreases in 23rd solar cycle", ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc1004.pdf, Proc. 31th ICRC, 2009.
- Belov A., Eroshenko E., Kryakunova O., Kurt V., Yanke V., "GLEs in the last three solar cycles". ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/Proceedings_of_CR_Conferences/31th-ICRC_2009_Lodz/pdf/icrc0993.pdf, Proc. 31th ICRC, 2009.
- R.T. Gushchina, A.V. Belov, V.N. Obridko, B. D. Shel'ting, “The role of cyclic solar magnetic field variations in the long-term cosmic ray modulation”, Advances of Space Research, Vol. 43, issue 4, p.673-679, 2009.
- E. Eroshenko, Belov A., Mavromichalaki, H., Oleneva, V., Papaioannou, A., Yanke V., “Anomalous Forbush effects from remote by longitude solar sources”, Universal Heliophysical Processes' Proceedings IAU Symposium No. 257, 2008 A.C. Editor, B.D. Editor & C.E. Editor, eds. © 2008 International Astronomical Union DOI: 00.0000/X000000000000000X, ISSN 1743-9213, 439-451, 2009
- A.V. Belov, “Forbush Effects And Their Connection With Solar, Interplanetary And Geomagnetic Phenomena”, Proceedings IAU Symposium No. 257, 2008 A.C. Editor, B.D. Editor & C.E. Editor, eds. © 2008 International Astronomical Union DOI: 00.0000/X000000000000000X, ISSN 1743-9213, 439-451, 2009
- G. Souvatzoglou, H. Mavromichalaki, C. Sarlanis, G. Mariatos, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke “Real-time GLE alert in the ANMODAP Center for December 13, 2006” Advances in Space Research, Volume 43, Issue 4, 16 February 2009, Pages 728-734
- C. Plainaki, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke “Neutron monitor asymptotic directions of viewing during the event of 13 December 2006” Advances in Space Research, Volume 43, Issue 4, 16 February 2009, Pages 518-522

C. Plainaki, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke "Modeling the solar cosmic ray event of 13 December 2006 using ground level neutron monitor data", *Advances in Space Research*, Volume 43, Issue 4, 16 February 2009, Pages 474-479

Eroshenko E., Velinov P., Belov A., Mishev A., Pletnikov E., Tassev Y., Yanke V. Relationship between cosmic ray neutron flux and rain flows in dependence on different latitudes and altitudes, *Proc. 21-st ECRS*, ed. by P. Kiraly, K. Kudela, M. Steglik, A.W. Wolfendale, p. 127-130, 2009.

Belov, A., Eroshenko, E., Mavromichalaki, H., Oleneva, V., Papaioannou, A., Yanke V. Cosmic ray variation properties during Forbush effects associated with far western solar sources, *Proc. 21-st ECRS*, ed. by P. Kiraly, K. Kudela, M. Steglik, A.W. Wolfendale, p. 274-277, 2009.

Belov A., Dryn E., Eroshenko E., Kryakunova O., Oleneva V., Papailiou M., Yanke V. "Behavior of the cosmic ray vector anisotropy near interplanetary shocks", *Proc. 21-st ECRS*, ed. by P. Kiraly, K. Kudela, M. Steglik, A.W. Wolfendale, p. 347-350, 2009.

A.V. Belov, R. T. Gushchina, V. N. Obridko, B. D. Shel'ting, Yu.V. Balabin. Manifestation of the solar global field changes in the long-term cosmic rays modulation *Proc. of ICRC 30th*, Mexico, v.1, 473-476, 2009.

A. Belov, E. Eroshenko, V. Kurt, V. Yanke. X-ray flares characteristics and probability of solar proton events, *Proc. of ICRC 30th*, Mexico, v.1, 167-170, 2009.

C. Plainaki, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, "Application of the NM-BANGLE model to GLE70", *Proceedings of the ICRC 30th*, Mexico, v.1, 281-284, 2009.

Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Lukovnikova A.A., Sdobnov V.E., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G., Kryakunova O.N., Variations of Parameters of Rigidity Spectrum of Cosmic Rays during events of January, 2005, *Proceedings of the ICRC 30th*, Mexico, v.1, 155-158, 2009.

Лотова Н.С., Владимирский К.В., Обридко В.Н., Диагностика потоков солнечного ветра 2008, *Письма в АЖ*, том 34, №7, стр. 551-560, (*Astronomy Letters*, Volume 34, Issue 7, pp.500-508)

2.1.3. Режимы истечения и турбулентности солнечного ветра по данным экспериментов радиозондирования когерентными сигналами космических аппаратов

Проведение серии экспериментов по двухчастотному радиопросвечиванию околосолнечной плазмы когерентными сигналами S-band и X-band космического аппарата MARS-EXPRESS предоставило еще одну возможность исследовать турбулентность солнечного ветра в области его ускорения и установившегося течения. Результаты спектральной обработки флуктуаций частоты и амплитуды сигналов, сравнение с аналогичными данными других экспериментов позволило прийти к следующим выводам:

- получены радиальные зависимости среднеквадратичного значения флуктуаций частоты и логарифма амплитуды S- и X-band сигналов;
- подтверждено, что показатель p пространственного спектра турбулентности в области ускорения солнечного ветра при расстояниях $R < 20R_s$ (R_s – радиус Солнца) уменьшается до значений 3.2...3.4. При $R < 7R_s$ наблюдаются спектры флуктуаций частоты с резким уменьшением спектральной плотности на флуктуационных частотах $\nu \approx (0.02...0.06)$ Гц. В области установившегося течения ($R > 20R_s$) среднее значение спектрального индекса $p = 3.67$ – такое же как для турбулентности Колмогорова-Обухова;
- показано, что относительная концентрация неоднородностей солнечного ветра слабо возрастает с увеличением гелиоцентрического расстояния в интервале $(10...40)R_s$;
- показано, что спектральная плотность логарифма амплитуды S- и X-band сигналов в частотном диапазоне $(0.01...0.5)$ Гц приблизительно постоянна и не обнаруживает зависимости от фазы цикла солнечной активности;
- показано, что характеристики турбулентности низкоширотного солнечного ветра практически не меняются в течение цикла солнечной активности.

А.И.Ефимов, Л.А.Луканина, Л.Н.Самознаев, И.В.Чашей, М.К.Берд, Д.Плеттемайер. Анализ частотных флуктуаций радиоволн в околосолнечной плазме по данным космического аппарата GALILEO // *Радиотехника и электроника*. 2009. Т. 54. № 7. С. 773-784.

A.I. Efimov, N.A. Armand, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, I.V. Chashey, and M.K. Bird. Investigation of coronal mass ejections by the two_position radio sounding method // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2009. V. 49. № 8. P. 1165-1169.

А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Берд, Д. Плеттемайр. О пространственном распределении характеристик турбулентности во внутреннем солнечном ветре // Астрон. Журн. 2010.
 A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Paetzold, S. Tellmann. Quasi-periodic fluctuations detected in MARS-EXPRESS coronal radio sounding observations // Solar Wind 12, Saint-Malo, France, June 21-26, 2009. Proc.
 A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold, S. Tellmann. Coronal Radio Sounding Experiments with MARS-EXPRESS: Scintillation Spectra During Low Solar Activity // Solar Wind 12, Saint Malo, France, 21-26 June, 2009. Proc.

2.2. Динамические процессы в межпланетной плазме

2.2.1. Продолжается изучение пространственной группировки резких и больших скачков потока ионов (плотности) солнечного ветра.

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. Установлено, что одной из областей, в которой число таких скачков сильно возрастает, является гелиосферный токовый слой.

Хабарова О.В., Застенкер Г.Н. Резкие изменения плотности солнечного ветра в турбулентных областях солнечного ветра, включая гелиосферный токовый слой. 5-ая конференция "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, февраль 2009.

Khabarova O.V. and G.N. Zastenker. Sharp solar wind density changes and their connection with heliospheric current sheet. Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-10186, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19 – 24 April, 2009.

2.2.2. Исследование перемежаемости флуктуаций потока плазмы солнечного ветра и ММП.

Рассмотрены различные особенности динамики флуктуаций плазмы солнечного ветра и модуля магнитного поля в области довольно высоких частот (вплоть до 1 Гц). Обнаружено, что характер зависимости эксцесса функции распределения вероятности флуктуаций (показателя перемежаемости) с продвижением в ранее неизученную область частот 0.1-1 Гц может сильно варьироваться.

Riazantseva M.O., G.N. Zastenker, M.V. Karavaev, 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 Conference Solar Wind 12, (в печати).

Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Караваев М.В. Перемежаемость флуктуаций потока солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, изучаемая с использованием данных с высоким разрешением (0.01-1 Гц) в областях резких изменений потока ионов солнечного ветра. Международная конференция MSS-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность", Москва, 23 - 25 ноября 2009.

2.2.3. Анализ радиоизлучения во время геоэффективных солнечных событий.

Проанализированы радиовсплески в диапазоне частот 100-1500 кГц, зарегистрированные в 1998-2000гг на ИСЗ Интербол-1 во время солнечных вспышек, предшествующих сильным геомагнитным бурям с $Dst < -100$ нТ. Наблюдаемые длинноволновые радиовсплески III типа солнечного происхождения на частотах 1460 и 780 кГц отличались большой величиной потока $S_f = 10^{-15} - 10^{-17}$ Вт/м² Гц и продолжались не менее 10 мин. Быстрый частотный дрейф всплеска продолжался до частоты 250 кГц, что свидетельствовало о распространении возбуждающего агента (пучка энергичных электронов) от Солнца к Земле. Для всех таких вспышек было характерно появление корональных выбросов массы (CME) типа гало, наблюдаемых на коронографе LASCO/SOHO и наличие южной компоненты межпланетного магнитного поля, измеренного на КА ACE и Wind. Вскоре после радиовсплесков на ИСЗ Интербол-1

регистрировались потоки энергичных электронов с энергией более 40 кэВ. Таким образом, регистрация радиовсплесков повышает надежность предсказания возбуждения магнитных бурь, а в случае отсутствия измерений СМЕ в определенной степени восполнить отсутствие этой информации.

Прокудина В.С., Курильчик В.Н., Ермолаев Ю.И., Кудела К., Сливка М. Особенности длинноволновых радиовсплесков от солнечных вспышек, предшествующих мощным геомагнитным бурям, Космические Исследования, 2009, Т.47. №1. с.17-24

2.2.4. Разработка МГД модели преломлённых в магнитные облака с пониженной плотностью плазмы и в магнитосферу Земли солнечных ударных волн и МГД закона затухания ударных волн.

Постановка задачи и метод расчёта. Представляет значительный интерес рассмотреть особенности типичных взаимодействий бегущих по потоку солнечного ветра быстрых ударных волн с границами магнитного облака, связанных с изменением плотности протонов и значительным ростом величины магнитного поля, и столкновение солнечного вращательного разрыва с контактным разрывом плотности в солнечной переходной области. При этом важно отметить перенос энергии через корональную плазму и плазму солнечного ветра, а также переход сильных магнитогидродинамических (МГД) разрывов одного типа в другой с образованием редко учитываемых неударных быстрых волн разрежения.

Для фронта ударной волны считаем выполненными МГД уравнения Рэнкина-Гюгонио. Тогда параметры потока за набегающей волной солнечного ветра и за головной ударной волной могут быть найдены по методу и классическим МГД. Для быстрых S_+ и медленных ударных волн S_- имеем:

$$S_+: \quad Du = u_2 - u_1 = \pm f_+, \quad Dv = v_2 - v_1 = \pm j_+ \text{sign } h$$

$$S_-: \quad Du = u_2 - u_1 = \pm f_-, \quad Dv = v_2 - v_1 = \pm j_- \text{sign } h,$$

$$\text{где} \quad f_{\pm} = \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{1 + h_2 z}} z v_A, \quad j_{\pm} = \left| \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{1 + h_2 z}} v_{A1} \right|, \quad z = \frac{\rho_2 - \rho_1}{h_2 - h_1} + \frac{1}{2}(h_2 + h_1),$$

$$h_i = \frac{B_{y1}}{B_x}, \quad u, \quad v \quad - \quad \text{компоненты вектора скорости. Верхний знак в формулах}$$

соответствует волне, идущей вверх, нижний - вниз по потоку.

Для быстрой (R_+) или медленной (R_-) волны разрежения будем иметь другие соотношения:

$$R_+: \quad u_2 - u_1 = m y_+, \quad v_2 - v_1 = \pm c + \text{sign } h,$$

$$R_-: \quad u_2 - u_1 = m y_-, \quad v_2 - v_1 = m c - \text{sign } h,$$

$$y_{\pm} = \left(\frac{v_{A1}}{g p_1^{1/2}} \right) \int_{p_2}^{p_1} (p / p_1)^{-\frac{(g+1)}{2g}} q_{\pm}^{1/2} dp,$$

$$c_{\pm} = \left(\frac{v_{A1}}{g p_1^{1/2}} \right) \int_{p_2}^{p_1} (p / p_1)^{-\frac{(g+1)}{2g}} \left[(1 - q_{\pm}) / (1 - p q_{\pm}) \right]^{1/2} dp$$

где g - показатель политропы, R_+ - быстрая волна разрежения, R_- - медленная, $q_{\pm}$ - решение дифференциального уравнения:

$$\frac{dp}{dq} + \frac{qp}{1-q} \frac{q}{q^2(1-q)} = 0, \quad q = g / (r - g).$$

Метод решения задачи, именуемой задачей Римана, заключается в следующем. По начальным условиям на произвольном разрыве определяем, какому неравенству удовлетворяют условия: или $p_0 > p_{s+}(h_0, h'_0, p'_0)$ ($p_{s+} < p_c$), или $p'_0 < p_{r+}(h'_c, h_c, p_0)$. Тогда ясно, уравнения каких линий нужно писать для волн, чтобы воспользоваться плоскостью значений компонент (Du, Dv) . Далее узнаем комбинации волн и разрывов, на которые распадается первоначальный разрыв. Затем получаем систему алгебраических уравнений, которую численно решаем.

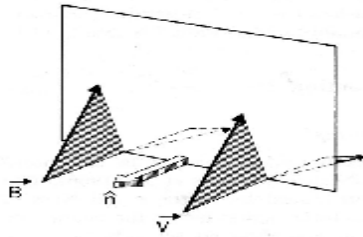


Рис.1. Пример типичного вращательного разрыва

Численное решение задачи о взаимодействии солнечного вращательного разрыва A (рис.1) с контактным разрывом $CD=C$ в переходной области можно осуществить на основе законов сохранения (условий динамической совместности) аналогично методике, используемой при изучении наклонных взаимодействий МГД сильных разрывов.

При плазменном параметре $b = 8pr / B^2$, угле $y = B_0 C = 30^\circ$ и угле между C и осью $X = 175^\circ$ получаем изложенным ранее методом:

$$AC \rightarrow \underset{\rightarrow}{R_+} \underset{\leftarrow}{A} \underset{\rightarrow}{S} \underset{\leftarrow}{C'} \underset{\rightarrow}{S} \underset{\leftarrow}{A} \underset{\rightarrow}{R_+},$$

где R_+ - быстрая волна разрежения, S_- - медленная ударная волна.

Представляется важным отметить тот факт, что в результате взаимодействия бездиссипативного вращательного разрыва с переходной зоной может возникнуть диссипативная медленная ударная волна, идущая вверх в корону Солнца. При $y = 15^\circ$ можно получить преломленную быструю ударную волну.

Эти волны могут влиять на спикюлы и создавать так называемые взрывные или взрывоподобные события.

Кроме того, решая задачу Римана, взаимодействия быстрых ударных волн со структурами с постоянным давлением (pbs), границами неоднородности или облака T'_p , T''_p и головной ударной волной перед облаком схематически можно представить в виде:

$$\S_+ pbs \rightarrow R_+ T'_p \S_+, \quad \S_+ T''_p \rightarrow \S_+ T''_p \S_+, \quad \S_+ \S_b \rightarrow R_+ \S_b$$

Таким образом, взаимодействие солнечной бегущей ударной волны с задней границей облака аналогично взаимодействию с магнитопаузой, за исключением более сильного сдувания отраженных волн разрежения потоком солнечного ветра.

Основные результаты, полученные в 2009 году

1. На основе МГД рассмотрения впервые доказано возникновение обратных быстрых волн разрежения в свободном потоке солнечном ветре.

2. Доказана возможность преломления солнечного вращательного разрыва при взаимодействии с контактным разрывом в переходной от хромосферы к короне Солнца области в виде диссипативной (быстрой или медленной) ударной волны.
3. Указывается на сдувание быстрой волны разрежения, возникающей при взаимодействии межпланетной ударной волны со структурой с постоянным давлением и с магнитным облаком в потоке солнечного ветра.
4. Выделяются плазменные структуры с постоянным давлением и разрывы направления как проявления распада произвольного разрыва в корональной плазме, численно моделируемые МГД методом пробного расчёта.

Гриб С.А. «О некоторой аналогии между взаимодействием солнечных ударных волн с магнитными облаками и магнитосферой Земли». Всероссийская конференция «Физика плазмы в солнечной системе». ИКИ РАН, 16-20 февраля 2009.

Гриб С.А. «Межпланетные разрывы как один из главных факторов динамики солнечно-земных связей». Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика, 2009», СПб, ГАО РАН, 5-11 июля 2009 г.

С.А.Гриб. «О некоторой аналогии между взаимодействием солнечных ударных волн с магнитными облаками и магнитосферой Земли». Всероссийская конференция «Физика плазмы в солнечной системе». ИКИ РАН, 16-20 февраля 2009 года. Презентация доклада Grib.ppt на сайте <http://solarwind.cosmos.ru/news.htm/>

С.А.Гриб, В.Б.Белаховский. «Влияние межпланетных вторичных волн разрежения на геомагнитное поле». Геомагнетизм и аэрономия, 2009, т.49, № 6, стр.768-776.

С.А.Гриб. «О догонном взаимодействии типичных ударных волн в потоке солнечного ветра». Письма в Астрономический журнал, 2010, т.36, №1, стр.61-65.

С.А.Гриб. «Межпланетные разрывы как один из главных факторов динамики солнечно-земных связей». Сб.трудов Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика, 2009», СПб, ГАО РАН, 2009 г.

S.A.Grib, E.A.Puskar', "Some specific characteristics of the interplanetary shock waves in the solar wind". Planetary Space Science.. (in press).

2.2.5. Результаты экспериментов по просвечиванию околосолнечной плазмы

А) Завершен анализ результатов экспериментов по просвечиванию околосолнечной плазмы поляризованными импульсами пульсаров PSR B0525+21 и PSR B0531+21. Наблюдения проводились на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц в июне 2005 и июне 2007 гг. в период минимума солнечной активности. По запаздыванию гигантских импульсов пульсара PSR B0531+21 получена радиальная зависимость концентрации плазмы: $N \sim R^{-2,7}$ в области гелиоцентрических расстояний $R = 5-10R_S$ (R_S – радиус Солнца). Характерное значение концентрации при $R = 5 R_S$ составляет $1,4 \times 10^{-4} \text{ см}^{-3}$ и оказывается существенно ниже, чем в период максимума солнечной активности. Как показывает сопоставление пространственного расположения просвечиваемых областей со стенфордскими данными о распределении магнитного поля на поверхности источника ($R = 2,5 R_S$), что луч зрения на пульсар проходил через полярную корональную дыру, что объясняет пониженные значения плотности плазмы. Характер радиальной зависимости концентрации указывает на то, что ускорение плазмы солнечного ветра в минимуме солнечной активности на высоких и средних гелиоширотах продолжается по крайней мере до гелиоцентрических расстояний около $10R_S$.

Б). Проведен анализ результатов экспериментов по просвечиванию солнечного ветра когерентными сигналами космического аппарата Mars Express на частотах S- и X-диапазонов. Измерения флуктуаций приведенной разности частот $\Delta f = f_S - 3/11 f_X$ и логарифма амплитуды радиоволн проводились в период с 25 августа по 22 октября 2004 г. при низком уровне солнечной активности. Данные относятся в основном к низким гелиоширотах, т.е. к медленному солнечному ветру. Определены радиальные зависимости среднеквадратичных значений и показателя степени временного спектра флуктуаций частоты. Подтверждено обнаруженное нами ранее уплощение спектра турбулентности

при приближении к Солнцу в область ускорения солнечного ветра. Исследованы низкочастотные, $0.01 \text{ Hz} < \nu < 0.5 \text{ Hz}$, нормированные временные спектры флуктуаций логарифма амплитуды в S- и X-диапазонах. Эти спектры, как показывают измерения, близки к плоским. Радиальные зависимости параметров сравнивались с аналогичными данными, полученными с помощью космического аппарата ULYSSES в 1991 г. при высоком уровне солнечной активности. Сделан вывод, что характеристики турбулентности низкоширотного солнечного ветра практически не меняются в цикле солнечной активности. В некоторых сеансах одновременно с флуктуациями радиосигналов измерялось их групповое запаздывание, позволившее определить радиальную зависимость средней концентрации плазмы. Сравнение радиальных зависимостей флуктуаций концентрации с радиальной зависимостью средней концентрации дает указания на слабое увеличение относительного уровня турбулентности с удалением от Солнца в области гелиоцентрических расстояний 10 – 40 радиусов Солнца. (совместно с ИРЭ РАН, Боннским и Кельнским университетами Германии.)

В) Проведен анализ данных, полученных в экспериментах радиопросвечивания солнечного ветра когерентными сигналами космических аппаратов Galileo, Ulysses, Nozomi, Viking, Венера 15, 16 на различных гелиоцентрических расстояниях внутри 1 а.е. и на различных фазах цикла солнечной активности. Основное внимание было уделено исследованию пространственных радиально-широтных распределений параметров, характеризующих пространственные энергетические спектры турбулентных флуктуаций концентрации плазмы: спектрального индекса, внешнего и внутреннего масштабов. Показано, что характеристики турбулентности медленного низкоширотного солнечного ветра на протяжении цикла в среднем остаются практически неизменными. Найдено, что в минимуме солнечного цикла внешний масштаб турбулентности быстрого высокоширотного солнечного заметно превышает внешний масштаб в медленном низкоширотном ветре. Внешний и внутренний масштабы турбулентности возрастают с удалением от Солнца примерно по линейному закону, так что протяженность инерционного интервала в пространстве волновых чисел остается примерно неизменной. Новые данные подтверждают вывод о том, что переход из области ускорения в область сформировавшегося течения сопровождается сменой режима турбулентности. Для быстрого солнечного ветра смена режима турбулентности происходит дальше от Солнца, чем для медленного. (Совместно с ИРЭ РАН, Боннским и Дрезденским университетами Германии.)

Fahr, H.-J. , Chashei, I. V. , Verscharen, D. Injection to the PUI regime from high energies and induced ion power laws // *Astronomy and Astrophysics*, Volume 505, Issue 1, 2009, pp.329-337

А.И. Ефимов, Л.А. Луканина, Л.Н. Самознаев, И.В. Чашей, М.К. Берд, Д. Плеттемейер. Анализ частотных флуктуаций радиоволн в околосолнечной плазме по данным космического аппарата GALILEO // *Радиотехника и электрон. (J.Com.Tech.)* V.54. No.7. P.765-775. 2009

I.V.Chashei, V. I. Shishov , T.V. Smirnova. Radio Sounding of the Outer Solar Corona by Polarized Pulsar Pulses // *Solar Physics* (в печати)

A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold, S. Tellmann. Coronal Radio Sounding Experiments with MARS-EXPRESS: Scintillation Spectra During Low Solar Activity // *Solar Wind 12 Proc.* (в печати)

А.И.Ефимов, Л.А.Луканина, Л.Н.Самознаев, И.В.Чашей, М.К.Берд, Д.Плеттемайер. О пространственном распределении характеристик турбулентности во внутреннем солнечном ветре // *Астрон. журн.* (в печати)

I.V.Chashei, V. I. Shishov , T.V. Smirnova. Radio Sounding of the Outer Solar Corona by Polarized Pulsar Pulses // *Remote Sensing of the Inner Heliosphere*, Aberystwyth, Wales, 5-8 May, 2009

A.I. Efimov, L.A. Lukanina, L.N. Samoznaev, V.K. Rudash, I.V. Chashei, M.K. Bird, M. Pätzold, S. Tellmann. Coronal Radio Sounding Experiments with MARS-EXPRESS: Scintillation Spectra During Low Solar Activity // *Solar Wind 12*, Saint Malo, France, 21-26 June, 2009

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

2.3.1. Открытие пояса энергичных нейтральных частиц на границе гелиосферы на космическом аппарате Interstellar Boundary Explorer (IBEX).

В 2009 году на КА IBEX были получены и опубликованы первые полные карты неба в потоках энергичных атомов гелиосферного происхождения в диапазоне энергий от 200 эВ до 6 кэВ (Запуск КА IBEX был осуществлен NASA осенью 2008 г. Участник проекта IBEX от ИКИ – В. Измоленов).

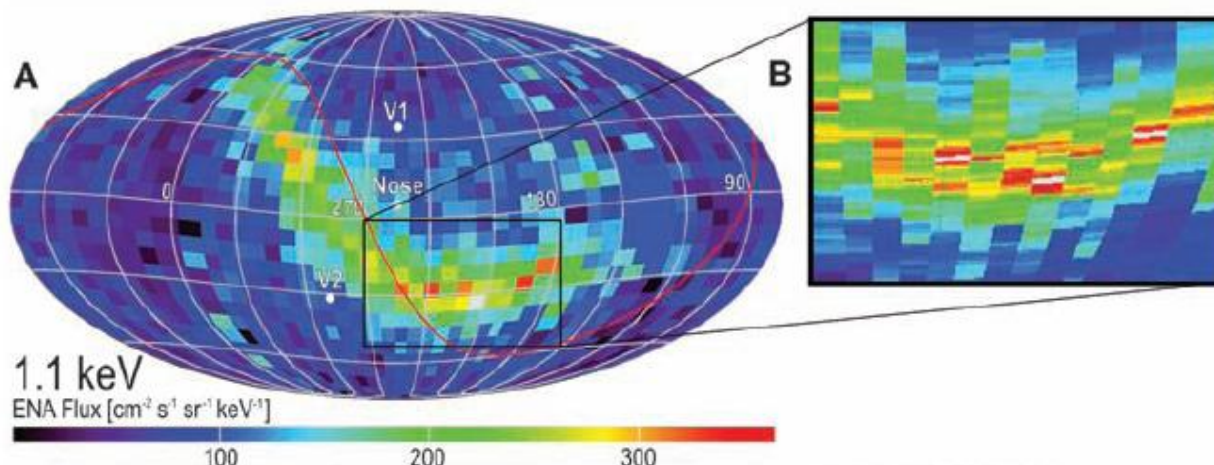


Рис. Потоки энергичных нейтральных атомов гелиосферного происхождения в различных направлениях луча зрения (карта неба) в эклиптических координатах. V1 и V2 - направления движения космических аппаратов Вояджер 1 и 2. Пояс ЭНА соответствует яркой полосе, проходящей между V1 и V2. (McComas et al., Science 2009)

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. Существование такого пояса не было предсказано не в одной из моделей внешней гелиосферы. Физическая природа этого пояса до настоящего времени не определена. Однако, 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, показано корреляция положения пояса ЭНА с направлением и величиной межзвездного магнитного поля. Физические механизмы, приводящие к образованию пояса, еще предстоит определить.

McComas D.J., Allegrini, F.; Bochsler, P.; Bzowski, M.; Christian, E.R.; Crew, G.B.; DeMajistre, R.; Fahr, H.; Fichtner, H.; Frisch, P.C.; Funsten, H.O.; Fuselier, S.A.; Gloeckler, G.; Gruntman, M.; Heerikhuisen, J.; Izmodenov, V.; Janzen, P.; Knappenberger, P.; Krimigis, S.; Kucharek, H.; Lee, M.; Livadiotis, G.; Livi, S.; MacDowall, R.J.; Mitchell, D.; Möbius, E.; Moore, T.; Pogorelov, N.V.; Reisenfeld, D.; Roelof, E.; Saul, L.; Schwadron, N.A.; Valek, P.W.; Vanderspek, R.; Wurz, P.; Zank, G.P., Global Observations of the Interstellar Interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX), Science, Volume 326, Issue 5955, pp. 959- 962 (2009).

Schwadron, N.A.; Bzowski, M.; Crew, G.B.; Gruntman, M.; Fahr, H.; Fichtner, H.; Frisch, P.C.; Funsten, H.O.; Fuselier, S.; Heerikhuisen, J.; Izmodenov, V.; Kucharek, H.; Lee, M.; Livadiotis, G.; McComas, D.J.; Moebius, E.; Moore, T.; Mukherjee, J.; Pogorelov, N.V.; Prested, C.; Reisenfeld, D.; Roelof, E.; Zank, G.P., Comparison of Interstellar Boundary Explorer Observations with 3D Global Heliospheric Models, Science, Volume 326, Issue 5955, pp. 966-968 (2009).

Möbius, E.; Bochsler, P.; Bzowski, M.; Crew, G.B.; Funsten, H.O.; Fuselier, S.A.; Ghielmetti, A.; Heirtzler, D.; Izmodenov, V.V.; Kubiak, M.; and 10 coauthors, Direct Observations of Interstellar H, He, and O by the Interstellar Boundary Explorer, Science, Volume 326, Issue 5955, pp. 969-971 (2009).

2.3.2. Анализ данных КА Вояджер 1 и 2 по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению (сравнение теории и эксперимента).

Были проведены расчеты распределений атомов водорода внутри гелиосферы на основе двумерных и трехмерных кинетико-газодинамических моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, а также расчеты рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в области внешней гелиосферы. В результате расчетов были получены карты интенсивностей рассеянного излучения для наблюдателя, находящегося на расстояниях 40-60 а.е. от Солнца. Полученные карты сравнивались с данными космических аппаратов Вояджер 1 и 2, измеренными между 1993 и 2003 годами. Проведенное сравнение показало, что наблюдаемое увеличение интенсивности рассеянного лайман-альфа излучения в направлении навстречу движению потока межзвездной среды связано с особенностями распределения межзвездных атомов водорода в области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Показано, что наблюдаемое увеличение интенсивности обусловлено рассеянием солнечных фотонов в окрестности точки торможения на гелиопаузе (контактной поверхности, разделяющей солнечный ветер и межзвездную плазму). Так как атомы, родившиеся в этой области вследствие перезарядки имеют существенно меньшие скорости по сравнению с атомами внутри гелиосферы, то фотоны, рассеянные на этих атомах, распространяются назад внутрь гелиосферы практически без поглощения и, следовательно, могут быть измерены на большом удалении от того места, где эти фотоны были рассеяны. Таким образом, форма и пространственная протяженность этого излучения могут служить источником информации о распределении межзвездных атомов в окрестности гелиопаузы. Детальное сравнение результатов моделирования с экспериментом показало, что увеличение интенсивности в модели существенно превосходит наблюдаемое. Данному количественному несоответствию теории и эксперимента необходимо найти объяснение в ближайшем будущем. Также необходимо рассмотреть возможность того, что наблюдаемое на КА Вояджер увеличение интенсивности близко к плоскости нашей Галактики, поэтому возможен вклад фотонов имеющих галактическое происхождение. Для того, чтобы определить роль галактических фотонов в дальнейшем планируется изучить карты Н-альфа излучения, которое должно коррелировать с галактическим Лайман-альфа.

Quemerais E., R. Lallement and J.L. Bertaux, B.R. Sandel, V. Izmodenov and Y. Malama, Ultraviolet Glow from the Hydrogen Wall, *Astrophys. Journal*, accepted, 2009.

2.3.3. Модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой с учетом локально-неравновесного характера плазмы за гелиопаузой. Роль межзвездных захваченных протонов.

Проведено исследование роли захваченных протонов, рожденных в области внешнего ударного слоя за гелиопаузой. Энергичные нейтральные атомы водорода, рожденные в области сверхзвукового солнечного ветра, а также во внутреннем ударном слое, могут пересекать гелиопаузу и проникать в область внешнего ударного слоя. За гелиопаузой такие атомы подвергаются перезарядке на межзвездных протонах в результате чего образуются новые энергичные захваченные протоны. Имея энергии около 1 кэВ и выше, такие захваченные протоны обладают большими длинами свободного пробега по сравнению с горячими межзвездными протонами, поэтому они могут рассматриваться как бесстолкновительные с немаксвелловской функцией распределения. Была разработана усовершенствованная модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой с учетом неравновесного характера захваченных протонов как в солнечном ветре, так и в межзвездной среде (Izmodenov et al. 2009). Учет неравновесного характера захваченных протонов во внешнем ударном слое был проведен впервые.

Izmodenov V.V., Local Interstellar Parameters as they are inferred from analysis of observations inside the heliosphere, *Space Science Reviews*, Volume 143, Numbers 1-4 / March 2009, pp. 139-150.

2.3.4. Вычисление потоков энергичных нейтральных атомов, родившихся в межзвездной среде за гелиопаузой. Сравнение с данными SOHO, Cassini и Venus Express.

Захваченные протоны из области внешнего ударного слоя могут перезаряжаться на межзвездных атомах, в результате чего образуются новые энергичные нейтральные атомы (ЭНА). Эти ЭНА, в свою очередь, могут проникать внутрь гелиосферы, где могут быть измерены на космических аппаратах (в частности, именно потоки энергичных нейтральных атомов измеряются на IBEX). В рамках новой неравновесной модели были вычислены потоки энергичных нейтральных атомов на 1 а.е. Показано, что ЭНА, рожденные во внутреннем ударном слое из протонов солнечного ветра, доминируют при энергиях порядка 0.02 – 0.2 кэВ. В этом энергетическом диапазоне потоки ЭНА из внешнего гелиошиса существенно меньше, но все еще заметны. При энергиях порядка 0.4 – 1.0 кэВ основной вклад в суммарный поток вносят ЭНА, образованные во внутреннем гелиошисе из захваченных протонов. А при энергиях больших, чем 1 кэВ потоки ЭНА из внешнего гелиошиса становятся доминирующими. Таким образом, показано, что ЭНА с энергиями более 1 кэВ могут иметь межзвездное происхождение. Сравнение полученных потоков с данными КА SOHO/CELIAS, Cassini/INCA и Venus Express показывают хорошее совпадение теории и эксперимента.

Izmodenov V.V., Local Interstellar Parameters as they are inferred from analysis of observations inside the heliosphere, Space Science Reviews, Volume 143, Numbers 1-4 / March 2009, pp. 139-150.

2.3.5. Исследовано взаимодействие ударных волн с возмущенными контактными разрывами в плазме с высвечиванием. Выявлено не анализировавшееся ранее немонотонное распределение параметров за фронтом ударной волны. Найдено, что переход ударной волны из более плотной среды в менее плотную приводит к существенно меньшим деформациям границы, чем в противоположном случае.

Проведены расчеты эволюции двумерных возмущений границы, ускоряемой сильной ударной волной от вспышки сверхновой звезды или при торможении звездного ветра межзвездной средой. Показано, что вид кривой функции охлаждения играет существенную роль в распределении параметров газа за преломленной ударной волной (рис. 1).

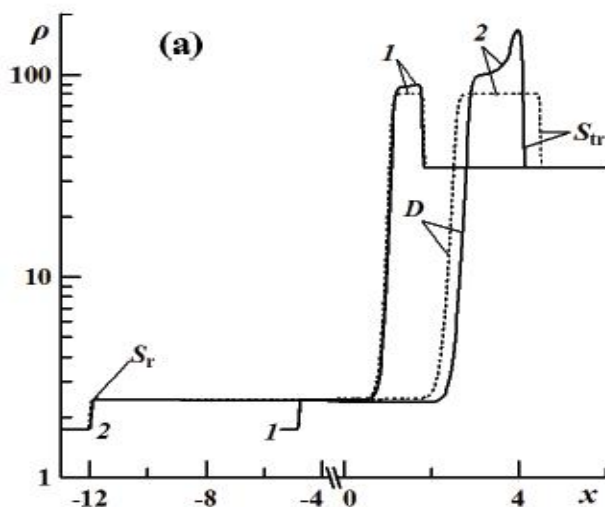


Рис. 1. Распределение плотности в моменты времени $t=2$ (кривые 1) и $t=5$ (кривые 2): (---) – адиабатическое движение, (—) – учет высвечивания. Время отнесено

В результате расчетов выявлено, что при прохождении ударной волны через плотный слой плазмы наибольшие изменения формы поверхности происходят на той границе слоя, внешняя нормаль к которой направлена в сторону, противоположную направлению скорости ударной волны (рис. 2, 3).

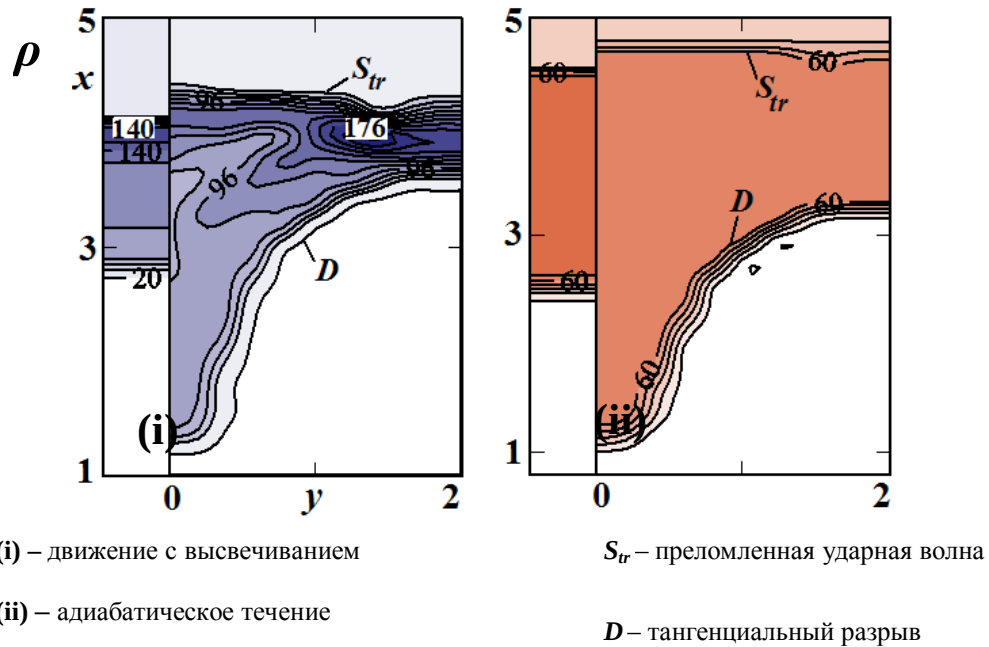


Рис.2 Изохоры до выхода ударной волны из слоя.

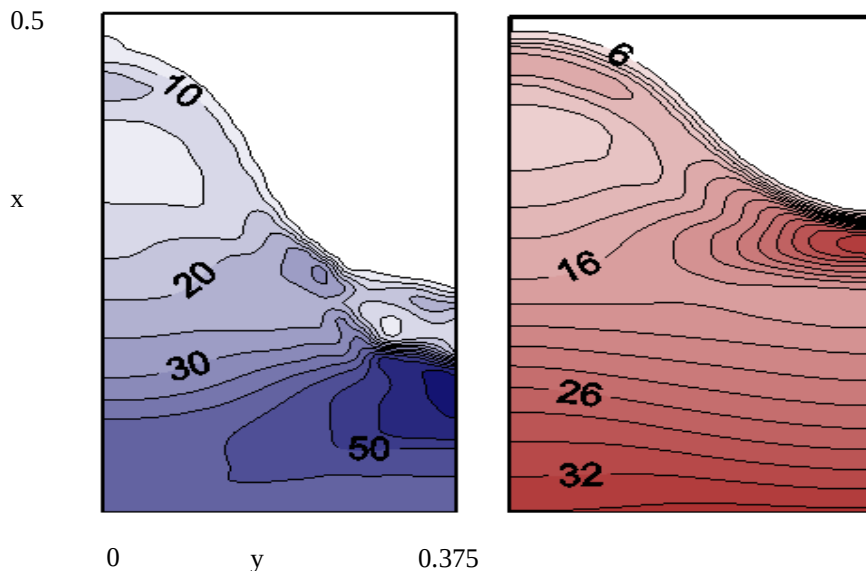


Рис.3. Изохоры после выхода ударной волны из слоя.

Р.Р. Тагирова. Роль переменности темпа высвечивания в распределении параметров плазмы за ударной волной // Тезисы докладов. VI Конференция молодых ученых Института космических исследований РАН, 2009. С. 40.

Р.Р. Тагирова. Численное моделирование взаимодействия ударных волн с возмущенными контактными разрывами в плазме с высвечиванием. // Тезисы докладов Международной конференции МСС-09. 23-25 ноября 2009 г.

2.3.6. Поток и изотопный состав гелия древнего солнечного ветра

Исследован изотопный состав и концентрация изотопов гелия в 9 образцах, отобранных на разных глубинах колонки грунта «Луны-24». Получено, что изотопный состав гелия остается с учетом случайных ошибок измерений неизменным. Концентрация гелия испытывает значительные вариации. Превышение и снижение от среднего значения составляют величины 1,5-2 раза. Полагая, что длина колонки грунта (1,6 мета) образовалась за счет длительного аккумуляирования обломочных лунных пород (реголита), на основе измерения космогенных изотопов разработан метод определения скорости накопления реголита и метод определения возраста образцов колонки грунта. Получено, что скорость накопления реголита непостоянна и по длине колонки меняется в пределах 0,2-0,8 см/10⁶ лет. Диапазон времени формирования исследованной части колонки составляет величину 100-600 миллионов лет. Сделан вывод, что двукратное превышение концентрации гелия над средним вызвано увеличением интенсивности солнечного корпускулярного излучения 500 миллионов лет назад. Наблюдаемое снижение концентрации (250 и 600 миллионов лет) может быть связано как с солнечными так и с лунными процессами. В частности, исследована возможность диффузионных потерь гелия по механизму скачковой диффузии. Найдены параметры диффузии и получено, что при низкой лунной температуре -120 °С существенные потери гелия могут происходить из лунного грунта возрастом 1 миллиард лет и более.

Г.С.Ануфриев, Поток и изотопный состав гелия древнего солнечного ветра, Космические Исследования, N1, 2010

2.3.7. Физические процессы в запыленной ионосферной плазме во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков.

На основании теоретических выкладок и численных расчетов показано, что важным процессом, приводящим к возбуждению пылевых звуковых возмущений в плазме запылённой ионосферы, является модуляционная неустойчивость электромагнитных волн, связанная с джоулевым нагревом, пондеромоторной силой, эффектами зарядки и динамики пылевых частиц. Оказывается, что возникновение наблюдаемых в спектре радишумов ионосферы во время интенсивных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Геминиды, Ориониды низкочастотных спектральных линий с характерными частотами, составляющими несколько десятков Герц, обусловлено модуляционным возбуждением электромагнитными волнами пылевых звуковых возмущений на высотах 80–120 км. Показано, что возбуждение пылевых звуковых возмущений во время интенсивных метеорных потоков приводит также к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Герц у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников. Возбуждение пылевых звуковых возмущений в ионосферной плазме во время интенсивных метеорных потоков может также приводить к формированию на высотах 110–120 км акустико–гравитационных вихревых структур. В результате, во время интенсивных метеорных потоков оказывается возможным усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба.

С.И. Попель. Генерация регулярных полей и модуляционное взаимодействие в природных и технологических плазменных системах. – М.: МФТИ, 2009. – 308 с. ISBN 978-5-7417-0317-5.

2.3.8. Гибридные пылевые ионно-звуковые солитоны в пылевой плазме

На основании теоретических выкладок и численных расчетов исследована возможность существования гибридных пылевых ионно-звуковых солитонов в пылевой плазме. Показано, что солитоноподобные возмущения затухают и замедляются, что связано с влиянием диссипации, обусловленной поглощением и рассеянием ионов плазмы на пылевых частицах. Тем не менее, амплитуда эволюционирующего возмущения в произвольный момент времени соответствует амплитуде солитона, вычисленного без учета диссипации для значения скорости, равного скорости эволюционирующего возмущения в рассматриваемый момент времени. Данное свойство позволяет трактовать эволюционирующее возмущение как «слабозатухающий» гибридный пылевой ионно-звуковой солитон. Обсуждаются возможности наблюдения гибридных пылевых ионно-звуковых солитонов в лабораторной и космической плазме.

T.V. Losseva, S.I. Popel, A.P. Golub', and P.K. Shukla, Evolution of Weakly-Dissipative Hybrid Dust Ion-Acoustic Solitons in Complex Plasmas, *Physics of Plasmas* **16**, No. 9 (2009) 093704, 5 pages.

2.3.9. Вихревые движения и перенос мелкодисперсных частиц в запыленной ионосфере

На основании теоретических выкладок и численных расчетов построена модель неадиабатической атмосферы, на основе которой рассмотрена возможность развития неустойчивости акустико-гравитационных волн. Показано, что причиной развития неустойчивости является совместное действие тепловых потоков солнечного излучения, инфракрасного излучения атмосферы, теплопроводности и конденсации паров воды в атмосфере. Получено дисперсионное уравнение, описывающее неустойчивость акустико-гравитационных волн. Выполнен анализ его решений в диапазоне высот от 5 км до 130 км. Оказывается, что неустойчивые решения существуют в верхней тропосфере и в ионосфере на высотах 110–130 км, что соответствует данным наблюдений. Показано, что возбуждение акустико-гравитационных вихрей в ионосфере на высотах 110–130 км в результате развития неустойчивости акустико-гравитационных волн, связанной с ненулевым балансом потоков тепла за счет солнечного излучения, конденсации паров воды, инфракрасного излучения атмосферы и теплопроводности, приводит к переносу наномасштабных пылевых частиц и их перемешиванию на высотах 110–120 км. Слои наномасштабных пылевых частиц в ионосфере толщиной порядка километра, образующиеся на высотах, меньших 120 км, распределяются по области существования акустико-гравитационных вихревых структур. В результате на высотах 110–120 км могут образовываться пылевые вихри. Оказывается возможным перенос частиц на высоты до высоты около 130 км. Одним из механизмов переноса наномасштабных пылевых частиц в ионосфере являются вертикальные потоки (стримеры), генерируемые пылевыми вихрями в результате развития параметрической неустойчивости.

Ю.Н. Беседина, С.И. Попель, П.К. Шукла, Вихревые движения и перенос мелкодисперсных пылевых частиц в ионосфере, Доклады Академии наук **429**, № 2 (2009) 253–256.

Ю.Н. Беседина, С.И. Попель, О возможности развития неустойчивости акустико-гравитационных волн в неадиабатической атмосфере, Проблемы взаимодействующих геосфер. Сборник научных трудов ИДГ РАН. – М.: ГЕОС, 2009, стр. 273–281.

¹ В июне–июле 2009 г. указанная статья была представлена на веб-сайте журнала *Physics of Plasmas* как **Research Highlight**.

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

2.4.1. Статистический анализ турбулентности магнитослоя

Проведено исследование статистических особенностей флуктуаций магнитного поля и потока плазмы на различных временных масштабах вне магнитосферы Земли по данным спутника Интербол-1. Анализ «грубых» характеристик турбулентности показал различие свойств турбулентности в разных частях магнитослоя. Спектральная плотность флуктуаций магнитного поля испытывает излом на частоте ~ 0.5 Гц. В качестве более «тонкой» характеристики эволюции на разных временных шкалах исследовались изменения формы и параметров функции плотности вероятности. Анализ высоты максимума функции плотности вероятности $P(0)$ и значений эксцесса показал наличие двух асимптотических режимов $P(0)$, которые характеризуются разными степенными законами, граница между которыми соответствует предположительно масштабам порядка ларморовского радиуса ионов. Исследование структурных функций разных порядков показало, что мелкомасштабная турбулентность в форшоке и магнитослое описывается разными феноменологическими моделями.

По данным наблюдений с высоким временным разрешением продолжено изучение сложной структуры магнитослоя (форшок, постшок, переходная область, внутренний магнитослой) и ее динамики в части вариаций потоков плазмы и параметров магнитного поля при различной ориентации ММП.

Козак Л.В., Пилипенко В.А., Чугунова О.М., Козак П.Н., Статистический анализ турбулентности магнитослоя, Космические исследования, 2009 (послано в печать).

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

3. Динамика магнитосфер Земли и планет

3.1. Передача энергии и импульса от солнечного ветра в магнитосферу

3.1.1. Баланс давлений на магнитопаузе и формирование низкоширотного погранслоя

В ходе предварительного анализа результатов наблюдений в многоспутниковом проекте THEMIS показано, что несмотря на значительные флуктуации магнитного поля и параметров плазмы магнитослоя, баланс давлений на магнитопаузе в подсолнечной точке может соблюдаться с достаточно высокой точностью.

Проведен анализ баланса давлений на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки в магнитоспокойных условиях для ряда пересечений магнитопаузы спутниками проекта THEMIS. Определялось динамическое, статическое давление 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. Показано что для исследованных событий в пределах ошибок измерений и применимости приближения анизотропной магнитной гидродинамики к бесстолкновительной плазме магнитослоя и магнитосферы, в среднем, с точностью в 7 % соблюдается условие баланса давлений в подсолнечной точке. В отдельном событии было зафиксировано соблюдение баланса с точностью в 3%. Проведен анализ процессов проникновения плазмы магнитослоя внутрь магнитосферы и формирования низкоширотного погранслоя.

Защищена кандидатская диссертация С.С. Россоленко на тему «Баланс давления на магнитопаузе и характеристики низкоширотного пограничного слоя в магнитосфере Земли».

Россоленко С. С., Е. Е. Антонова, Г.Н. Застенкер, И. П. Кирпичев, Баланс давления на магнитопаузе вблизи подсолнечной точки по данным наблюдений спутников проекта THEMIS, Космические исследования, принято к публикации.

Rossolenko, S.; Antonova, E.; Kirpichev, I.; Yermolaev, Yu., Interaction of Solar Wind with Earth's Magnetosphere and Formation of Magnetospheric Boundary Layers, SPACE PLASMA PHYSICS: School of Space Plasma Physics. AIP Conference Proceedings, Volume 1121, pp. 135-140, 2009.

Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Кирпичев И.П., Исследование баланса давления на магнитопаузе в подсолнечной точке по данным наблюдений спутников проекта THEMIS, Конференции «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» 17-20 ФЕВРАЛЯ 2009 Г., ИКИ РАН, Сборник тезисов, с. 40.

Rossolenko S.S., E.E.Antonova, I.P. Kirpichev, Magnetopause pressure balance in subsolar point during northward IMF orientation and high level of turbulence in magnetosheath in accordance with THEMIS data, IAGA-2009 abstracts, Sopron, Hungary, 23-30 August 2009, 301-MON-O0945-0031.

Antonova E.E., M.V. Stepanova, I.P. Kirpichev, S.S. Rossolenko, I.L. Ovchinniko, K.G. Orlova, M.S. Pulinets, Turbulence and stress balance in the magnetosphere of the Earth, Nonlinear magnetosphere Conference, Schedule of talks, January 19-23, 2009, Vina del Mar, Chile, p. 3.

Antonova E.E., Turbulence in magnetosheath and the problem of plasma penetration inside the magnetosphere, Abstracts of the 2009 ILWS Workshop, The Influence of Solar Variability on Geophysical and Heliospheric Phenomena, Ubatuba, Brazil, October 4-9, 2009, TU01.

Rossolenko S.S., E.E.Antonova, I.P. Kirpichev, Magnetopause pressure balance in subsolar point during northward IMF orientation and high level of turbulence in magnetosheath in accordance with THEMIS data, IAGA-2009 abstracts, Sopron, Hungary, 23-30 August 2009, 301-MON-O0945-0031

3.1.2. Продолжена работа по восстановлению радиальных профилей плазменного давления внутри магнитосферы (от 7 Re до магнитопаузы) по данным проекта THEMIS.

Проведено моделирование распределения поперечных токов в высокоширотной магнитосфере. Предполагалось соблюдение условия магнитостатического равновесия. Получены радиальные профили давления на геоцентрических расстояниях от 7 до 10 радиусов Земли с использованием результатов наблюдений в эксперименте THEMIS. Учтено сжатие магнитосферы в дневные часы, приводящее к смещению минимальных значений магнитного поля на магнитной силовой линии от экватора к высоким широтам. Определено распределение поля вдоль магнитной силовой линии. Получены плотности поперечного тока на дневных силовых линиях и определен интегральный ток. Показано, что интегральный ток в дневной части магнитосферы может замыкаться внутри магнитосферы, составляя высокоширотное продолжение кольцевого тока – разрезной кольцевой ток.

Кирпичев И.П., Е.Е.Антонова, К.Г. Орлова. Структура поперечных токов в высокоширотной магнитосфере. ОФН-16 конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16-20 февраля 2009 г.

Antonova E.E., I.P. Kirpichev, M.V. Stepanova, K.G. Orlova, I.L. Ovchinnikov. Topology of the high latitude magnetosphere during large magnetic storms and the main mechanisms of relativistic electron acceleration. Advances in Space Research, 43 (2009) 628–633.

Antonova E. E., I. P. Kirpichev, I. L. Ovchinnikov, K. G. Orlova, and M. V. Stepanova. High latitude magnetospheric topology and magnetospheric substorm. Ann. Geophys., 27, 4069–4073, 2009.

3.1.3. Воздействие больших изменений динамического давления солнечного ветра на магнитосферу земли: анализ нескольких событий.

Рассмотрена реакция магнитосферы и ионосферы на приход к Земле больших изменений динамического давления солнечного ветра с резкими фронтами. Показано, что под воздействием импульса давления солнечного ветра изменяется магнитное поле на геосинхронной орбите: оно возрастает при возрастании давления солнечного ветра и уменьшается, если давление солнечного ветра падает. Потоки энергичных частиц также изменяются: на дневной стороне магнитосферы потоки энергичных частиц возрастают с

приходом импульса динамического давления солнечного ветра, а на ночной стороне реакция потоков энергичных частиц зависит от направления межпланетного магнитного поля. При условии отрицательной B_z компоненты ММП на ночной стороне магнитосферы могут наблюдаться инжекции потоков энергичных электронов.

Показано, что большое и быстрое возрастание давления солнечного ветра, сопровождающееся слабо отрицательной B_z компонентой ММП, может приводить к высыпанию частиц на дневной стороне аврорального овала, и развитию псевдобрейкапа или суббури на ночной стороне овала. Динамика аврорального овала показывает, что после прохождения импульса динамического давления солнечного ветра авроральная активность ослабевает. Иными словами, импульс давления солнечного ветра в присутствии слабо отрицательного ММП может не только вызывать развитие псевдобрейкапа/суббури, но и контролировать это развитие.

Borodkova N.L. and G.N. Zastenker. Influence of the large and sharp solar wind pressure pulses on the magnetosphere: several case studies, Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-0-3692, 2009, EGU General Assembly, Vienna, Austria, 19 – 24 April, 2009.

Borodkova N.L. and G.N. Zastenker. Solar wind pressure pulses effect on the magnetosphere: several case studies, 6th Annual General Meeting of AOGS, Singapore, 11 - 15 August, 2009, p.198.

Бородкова Н.Л. Воздействие больших и резких изменений динамического давления солнечного ветра на магнитосферу земли: анализ нескольких событий. Космич. Исслед., 2010, том 48, № 1, с. 1–15.

3.1.4. Исследование появления широкополосных пульсаций геомагнитного поля в диапазоне 0.5-5 Гц при скачках потока солнечного ветра.

На довольно большом числе событий выявлено появление в геомагнитном поле всплесков сравнительно высокочастотных геомагнитных пульсаций в ответ на приход к магнитосфере резких и больших скачков потока ионов солнечного ветра. Изучены особенности этих всплесков.

Пархомов В.А., Г.Н. Застенкер, М.О. Рязанцева, Б. Цегмед, Т.А. Попова. Всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2-5 Гц, возбуждаемые большими скачками давления солнечного ветра. Космические исследования, в печати

Пархомов В.А., Застенкер Г.Н., Рязанцева М.О., Цэгмед Б., Попова Т.А., Три типа магнитосферного отклика в геомагнитных пульсациях частотного диапазона 0.2-5 Гц на большие и резкие скачки давления солнечного ветра. 5-ая конференция "Физика плазмы в солнечной системе", ИКИ РАН, февраль 2009.

3.1.5. Показано сосуществование эффективного раделения движущейся и застойной плазмы турбулентным транспортным барьером вместе с супердиффузией и концентрированными плазменными струями.

В ходе анализа данных проектов Интербол и Кластер было показано, что высокоширотный турбулентный погранслои (ТПС) над полярными каспами и плазменной мантией в сингулярной точке ветвления магнитного поля у высокоширотной магнитопаузы (МП), являться транспортным барьером или препятствием, эффективно разделяющим движущуюся плазму магнитослоя от застойной плазмы полярных каспов.

В тоже время, изучение зависимости от времени среднеквадратичного смещения вдоль нормали к границе продемонстрировало наличие супердиффузии в таких барьерах, по всей видимости, обусловленной плазменными струями, с концентрированной, по сравнению с солнечным ветром, кинетической энергией.

Это необычное сочетание свойств транспортных барьеров представляется важным для исследования удержания плазмы в термоядерных установках, статистические свойства пограничных слоев в которых оказались схожими со свойствами магнитосферных транспортных барьеров, включая супердиффузию.

Amata E., S.P. Savin, D.Ambrosino, Y. Bogdanova, R. Treumann, M. F. Marcucci, S. Romanov, A.Skalsky, High kinetic energy density jets in the Earth's magnetosheath: a case study. J. Geophys. Res., submitted 2009.
Savin S., L. Zelenyi, G. M. Polishchuk et al., ROY - a multiscale magnetospheric mission in collaboration with Cross-Scale and SCOPE. Planetary and Space Science, submitted 2009.

3.1.6. Увеличение заблаговременности прогноза магнитных бурь по солнечному ветру.

Характеристики магнитной бури и, в частности, геомагнитного возмущения определяются свойствами солнечного ветра и ММП, взаимодействующих с магнитосферой Земли. Развитие магнитной бури носит постепенный кумулятивный характер и может занять несколько часов после первого касания магнитосферы межпланетным возмущением. Это дает возможность увеличить заблаговременность прогноза, вырабатывая предварительный прогноз по первым признакам магнитной бури при некоторой приемлемой потере точности. Опережение прогноза формируется за счет разницы скоростей радиосигнала из точки либрации и скорости солнечного ветра, составляя около часа. Динамические модели эволюции Dst используют дифференциальное уравнение, зависящее от параметра солнечного ветра Q, обычно являющегося функцией V и Vz. Максимум бури может быть аппроксимирован величиной $Q \cdot \tau$, где τ - постоянная времени кольцевого тока. Сбор и анализ параметров и характеристик солнечного ветра выполнялся по данным OMNI.

Прогностический потенциал предлагаемого алгоритма прогнозирования максимума Dst на основе определения точек насыщения подтверждается результатами анализа его применения по данным 38 событий в период с 1978 по 2000 г, а также бурь 2001 года. Для большинства событий прогноз Dst принимает относительно стабильные значения, отличающиеся от истинного максимума на величину, не превышающую 25-30%. Наиболее часто прогностическое значение имеют оценки Dst, полученные за 1-3 часа до максимума бури. В ряде случаев устойчивый прогноз наблюдается за 10 и более часов.

Podladchikova T.V., A.A. Petrukovich, The storm-time Dst index prediction based on the measurements of the solar wind and the interplanetary magnetic field. 9th Ukrainian Conference on Space Research, 31 Aug - 5 Sept, 2009, Evpatoria, Ukraine Abstracts, p.9.

Podladchikova T.V., A.A. Petrukovich, Magnetic Storm Strength Forecast With Increased Prediction Time. "The Sixth European Space Weather Week", 16-20 Nov 2009, Brugge, Belgium.

3.1.7. Выполнен ретроспективный анализ сохранившихся архивных материалов российской сети геомагнитных станций.

Показано, что известное событие августа-сентября 1859 г. было первым и наиболее мощным в серии последующих рекуррентных геомагнитных бурь с более слабой интенсивностью. Найдено, что аналогичные серии наблюдались неоднократно и в дальнейшие годы. Их происхождение обусловлено суперпозицией потоков солнечного ветра. Роль М-областей Бартельса, ответственных за инициирование и развитие таких геомагнитных бурь, играют спорадические и регулярные компоненты в деятельности комплекса из активных областей и корональных дыр на вращающемся Солнце. Ни корональные дыры, ни активные области сами по себе в отдельности не являются достаточными для объяснения наблюдений. Сделан вывод о том, что небывалое по многим своим характеристикам множественное событие, имевшее место 2-3 сентября 1859 г., было вызвано серией из трех повторных эруптивных вспышек на Солнце в течение времени порядка двух десятков часов. Первая из вспышек была хорошо зарегистрирована наблюдателями вблизи центра солнечного диска 1 сентября 1859 г. и называется в литературе кэррингтоновским событием по имени одного из ее открывателей. Исследованы характеристики уникального по своей амплитуде явления

геомагнитного кроше, связанного с большим потоком ионизирующей электромагнитной радиации во время этой вспышки. Величина и направление зарегистрированного возмущения магнитного поля во время максимума развития геомагнитной бури однозначно свидетельствует о том, что все российские станции находились внутри полярной шапки или в зоне аврорального овала, размер которого был сильно расширен к югу от среднего своего положения. Зависимость возмущения от долготы станций - отсутствие явления «зашкаливания» в Нерчинске, - интерпретируется как возможное проявление большой асимметрии эффективного контура токовой системы, соединенной с гелиосферой и охватывавшей возмущенную магнитосферу и ионосферу на короткое время длительностью всего лишь 1-3 часа.

Веселовский И.С., Мурсула К., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Яковчук, О.С., Спорадические и рекуррентные геомагнитные возмущения в 1859–1860 гг. по архивным данным российской сети станций, Геомагнетизм и аэрономия, 2009, Т.49, №2, С. 174-179.

Тясто М.И., Птицына Н.Г., Веселовский И.С., Яковчук О.С., Экстремально сильная геомагнитная буря 2–3 сентября 1859 г. по архивным магнитным данным российской сети наблюдений, Геомагнетизм и аэрономия, 2009, Т.49, №2, С. 163-173.

3.1.8. Исследована связь геомагнитных вариаций в канадском регионе с их причинами на солнце и в гелиосфере на фазе спада 23-го цикла солнечной активности.

В этот период времени на орбите Земли преобладали рекуррентные высокоскоростные потоки из низкоширотных корональных дыр. Дневные и часовые индексы геомагнитной активности сопоставлены со скоростью солнечного ветра и площадью корональных дыр с учетом соответствующих временных сдвигов, зависимости от времени года и освещенности ионосферы, а также гелиоширотного положения корональных дыр относительно Земли. Сделан вывод о том, что ожидаемые индексы геомагнитной активности на время более суток вперед точнее вычисляются по найденным в работе эмпирическим корреляционным связям с площадью корональных дыр, нежели по измерениям скорости солнечного ветра вблизи орбиты Земли. Это упрощает задачу прогнозирования геомагнитных возмущений.

Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Трищенко Л.Д., Исследование корреляционных связей между площадью корональных дыр, скоростью солнечного ветра и локальными магнитными индексами в канадском регионе на спаде 23-го цикла солнечной активности, Геомагнетизм и аэрономия, 2009, Т.49, №4, С. 435-445.

3.1.9. Исследования магнитной турбулентности в области внешнего каспа Земли.

Продолжаются исследования магнитной турбулентности в области внешнего магнитосферного каспа Земли и в его окрестностях. Последними достижениями, полученными в результате анализа флуктуаций магнитного и электрического полей, измеренных на четырех спутниках Кластера, явились:

- 1) открытие волнового распада, а также
- 2) доказательство на основе экспериментальных данных резонансной природы турбулентности бесстолкновительной плазмы и
- 3) обнаружение вихревого характера волновых структур при разных значениях плазменного β .

Romanov S. A., S. P. Savin, E. Amata, M. Dunlop. Magnetic field turbulence and regular oscillations in terrestrial cusp and its vicinities. Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2009-A-04911, 2009.

Romanov S. A., E. Amata, M. Dunlop, S. P. Savin. Особенности генерации КНЧ волн в земном магнитосферном каспе и его ближайшей окрестности. Доклад на очередной конференции «Физика плазмы в солнечной системе», 16 - 20 февраля 2009 г, ИКИ РАН по программе ОФН-16. Материалы конференции.

Romanov S.A. Evidence of a resonant nature of turbulent energy transformation in the region of the solar wind interaction with the Earth. Доклад на Международной конференции "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность", (МСС-09) с 23 по 25 ноября 2009 г. ИКИ. Материалы конференции.

3.1.10. Продолжение сопоставления с новой магнитослойно-магнитосферной моделью измерений положения границ и поведения параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое по данным спутника Интербол-1.

Продолжается изучение нескольких отобранных для детального рассмотрения по данным спутника Интербол-1 событий с очень кратковременными (на несколько минут), но четкими вхождениями спутника из солнечного ветра в магнитослой. Как правило, эти события плохо объясняются обычным движением границ магнитослоя под действием изменения параметров солнечного ветра и ММП. Выдвинута гипотеза, что хотя бы некоторые из этих событий могут быть, в принципе, следствием мало изученного эффекта - резкого изменения политропного индекса плазмы солнечного ветра.

Материал готовится к печати.

3.1.11. Исследование механизмов генерации магнитных бурь разными типами солнечного ветра.

На основе архива данных OMNI для периода 1976-2000 годов выполнен анализ межпланетных источников 798 геомагнитных бурь с $Dst < -50$ нТ для следующих крупномасштабных типов солнечного ветра: CIR (145 магнитных бурь), Sheath (96); магнитные облака MC (62); Ejecta (161), источник остальных 334 магнитных бурь оказался неопределенным. Для данного анализа был впервые использован двойной метод наложения эпох, в котором за опорные времена взяты моменты онсета магнитной бури и минимума Dst индекса. С одной стороны, с помощью этого метода были подтверждены ранее полученные результаты, а с другой стороны, получены новые результаты: (1) впервые получены указания, что существуют различия в эффективности двух подклассов межпланетных СМЕ: MC и Ejecta, а также Sheath перед ними, (2) независимым методом нами был убедительно показан тот факт, что существует «память о предыстории» процесса генерации магнитной бури.

Ермолаев Ю.И., И.Г. Лодкина, Н.С. Николаева, М.Ю. Ермолаев, Статистическое исследование влияния межпланетных условий на геомагнитные бури, Космические исследования, 2010 (в печати)
Yermolaev Y.I., N.S. Nikolaeva I.G. Lodkina, M.Yu. Yermolaev, Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis, Adv.Space Res., 2010 (in press)

3.1.12. Обзор современных представлений о солнечных и межпланетных источниках магнитных бурь.

Приведен краткий обзор современных представлений о солнечно-земных связях, отвечающих за передачу солнечных возмущений и генерацию магнитных бурь на Земле. Даны количественные оценки вероятности возбуждения магнитных бурь различными солнечными и межпланетными явлениями; сравнивается эффективность процессов генерации бурь различными типами течений солнечного ветра. Анализ публикаций по геоэффективности солнечных и межпланетных явлений и результаты, полученные авторами, позволил авторам сделать следующие выводы.

- Оценка геоэффективности зависит от методов идентификации и классификации явлений, а также от методов и направления поиска корреляций между явлениями (обратная трассировка не дает оценок геоэффективности).
- Геоэффективность (вероятность процесса генерации магнитной бури) для СМЕ и вспышек составляет 40-60% , что лишь немного превышает вероятность случайных процессов.

- Прогноз геомагнитных бурь на основании солнечных наблюдений может содержать большой процент «ложных тревог».
- Геоэффективность *ICME (Sheath + MC)* составляет 60-80%.
- Геоэффективность *CIR (Corotating Interaction Region)* составляет 20-35%.
- Не обнаружено существенных различий в «*peak-to-peak*»-зависимостях $Dst - Bz$ и $Dst - E_u$ для магнитных бурь, генерированных *MC*, *Sheath* и *CIR*, хотя существуют различия в их развитии.
- Минимальная величина Bz -компоненты ММП наблюдается в *MC*, а минимальное значение Dst -индекса – в *Sheath*, т.е. эффективность физического процесса генерации бури во время *Sheath* более высока, чем во время *MC*. Возможно, это объясняется более высоким уровнем вариаций поля и давления в *Sheath*.

Полученные результаты, и прежде всего различия, связанные с различными типами солнечного ветра, позволяют построить более надежные схемы прогноза магнитных бурь.

Ермолаев Ю.И. , М.Ю. Ермолаев, Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды, Геофизические процессы и биосфера , 2009, Т. 8, № 1, с. 5–35

Парновский А. С., Ю. И. Ермолаев, Космическая погода: история исследования и прогнозирование, Космическая наука и технология, 2009 (в печати)

3.2. Динамика токовых слоев в хвосте и на границах магнитосферы

3.2.1. Исследование низкочастотных Альвеновских волн, ассоциированных с высокоскоростными потоками плазмы в Пограничном плазменном слое.

На основе анализа 170 пересечений спутниками Cluster пограничного плазменного слоя (ППС) геомагнитного хвоста (на расстояниях от Земли $\sim -15 - -19 R_E$) установлено, наличие низкочастотных ($f \sim 0.004 - 0.02$ Гц) волновых возмущений магнитных трубок, распространяющихся к Земле вдоль высокоширотной границе ППС с локальной Альвеновской скоростью. Также установлено, что в интервалы наблюдений низкочастотных Альвеновских волн, на высокоширотной границе ППС регистрировались потоки ускоренной плазмы, движущиеся вдоль магнитного поля со скоростью в два и более раз превышающую локальную Альвеновскую скорость. Характерные периоды наблюдаемых Альвеновских возмущений 1 - 4 мин и характерные длины волн 5 - 20 R_E . Поток электромагнитной энергии, переносимый волнами во время спокойных геомагнитных периодов не превышал $0.02 \cdot 10^{-3}$ Дж/м²·сек, а в возмущенные периоды достигал $0.08 \cdot 10^{-3}$ Дж/м²·сек. Однако, даже эта величина составляла всего лишь несколько процентов от потока кинетической энергии переносимой потоком ускоренной плазмы. Последнее свидетельствует о том, что потери энергии плазменным потоком на возбуждение низкочастотных электромагнитных волн незначительны. Статистический анализ плотностей продольных токов, наблюдаемых на высокоширотной границе ППС, показал, что в большинстве рассмотренных случаев величина продольного тока была близка к нулю. Это позволило исключить токовую неустойчивость и рассматривать неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (К-Г) как наиболее вероятный источник возбуждения низкочастотных плазменных колебаний.

Проведено исследование неустойчивости Кельвина – Гельмгольца в плоской трехслойной геометрии для случая, когда магнитное поле в потоке направлено вдоль скорости потока. Получено общее дисперсионное уравнение и показано, что, в отличие от обычно рассматриваемого случая развития неустойчивости на границе между двумя движущимися относительно друг друга плазменных потоков, в трехслойной системе неустойчивость может развиваться при произвольном отношении скорости плазменного потока к звуковой скорости. Возмущения с длинами волн порядка или больше толщины потока могут нарастать даже при нулевой температуре, причем рассматриваемая система может быть неустойчива относительно роста длинноволновых возмущений и в случае, когда на одной из границ скорость потока меньше суммы альвеновских скоростей в

потоке и окружающей плазме. Исследованы зависимости инкрементов и частот генерируемых длинноволновых колебаний от параметров потока и окружающей плазмы. В частности, показано, что поворот магнитного поля в окружающей плазме относительно направления скорости потока приводит к росту инкремента. Проведенное сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в ходе многоспутникового проекта CLUSTER, из которых следует, что во многих случаях наряду с распространением потока ускоренных частиц в пограничной области плазменного слоя хвоста магнитосферы Земли наблюдается и распространение колебаний магнитного поля со скоростью порядка локальной альвеновской скорости, показало адекватность предложенной модели реально наблюдаемым событиям.

Grigorenko E.E., T.M. Burinskaya, M. Shevelev, J.-A. Sauvaud, L.M. Zelenyi, Ultra low-frequency waves associated with high-energy ion flows in the PSBL of the Earth magnetotail, J. Geophys. Res., submitted 2009.

3.2.2. Наблюдение продольных токов в Пограничном плазменном слое спутниками Cluster.

С помощью четырехспутниковых измерений Cluster установлено, что в геомагнитно - спокойные интервалы продольные электрические токи в ППС не наблюдаются, не смотря на присутствие в этой области высокоскоростных ионов движущихся к Земле вдоль силовых линий магнитного поля со скоростями ≥ 1000 км/с. В этом случае, вклад ионов в продольный ток скомпенсирован продольным током, создаваемым электронами, движущимися вместе с ионами. Таким образом, не смотря на наблюдаемую коллимацию высокоскоростных ионов по энергиям и питч-углам, их нельзя считать пучками, а следует рассматривать как часть высокоскоростного потока плазмы. По-видимому, в такие интервала времени X-линия отсутствовала, по крайней мере, в ближних к Земле областях хвоста.

В возмущенные периоды спутники Cluster зафиксировали систему продольных токов, состоящую из тока текущего к Земле вдоль высокоширотной границы ППС и тока, направленного от Земли внутри ППС. Такая система токов может быть связана с присутствием X-линии сравнительно недалеко от Земли. Благодаря многоточечным наблюдениям Cluster удалось оценить пространственный размер токовой структуры (вдоль нормали к поверхности ППС), который составил для тока, текущего к Земле вдоль высокоширотной границы ППС, ~ 1600 км, и для тока, текущего от Земли внутри ППС - $\sim 1 R_E$. Длительности наблюдения данной токовой структуры в большинстве случаев составляли $\sim$ нескольких минут, что указывало на скорее квазистационарный, чем импульсный характер магнитного пересоединения.

Grigorenko E.E., Hoshino M., Hirai M., Mukai T., Zelenyi L.M., "Geography" of ion acceleration in the magnetotail. X-line versus Current Sheet effects, J. Geophys. Res., 114, A03203, doi:10.1029/2008JA013811, 2009.

Grigorenko E.E., L.M. Zelenyi, M.S. Dolgonosov, J.-A. Sauvaud, Spatial and temporal structures in the vicinity of the Earth's tail magnetic separatrix. Cluster observations, Book of Proceedings of 15th Cluster Workshop and CAA School, p.p. 435-453, 2009.

Zelenyi L.M., M.Dolgonosov, E.E. Grigorenko, J.-A. Sauvaud, Peculiarities of the non-adiabatic ion acceleration in the current sheet of the Earth magnetotail, in Future Perspectives of Space Plasma and Particle Instrumentation and International Collaborations edited by M. Hirahara, I. Shinohara, Y. Miyoshi, N. Terada, and T. Mukai, American Institute of Physics, p.p.5-14, 2009.

3.2.3. Экспериментальное подтверждение неадиабатического ускорения ионов в токовом слое в области замкнутых силовых линий магнитного поля.

Экспериментально доказано наличие в Токовом Слое (ТС) геомагнитного хвоста пространственно локализованных источников неадиабатического ускорения ионов, находящихся в области замкнутых силовых линий магнитного поля. Статистически установлено, что ускорение ионов в таких источниках носит квазистационарный характер

(длится как минимум в течение 10 мин) и имеет место в спокойные геомагнитные периоды. Источники ускорения находятся в дальнем хвосте на расстояниях более 110 R_E от Земли. Экспериментально установлено, что ширина функции распределения ионных пучков по параллельным скоростям зависит от близости источника ускорения к X-линии (увеличивается при приближении к X-линии). Также установлено, что в случае близости источника к X-линии, существенную роль в ускорении ионов играют индукционные электрические поля.

Grogorenko E., R. Koleva. Variability of discrete plasma structures in the lobe-plasma sheet interface, *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.* v.62, No11, 1449-1456, 2009

Григоренко Е.Е., Колева Р., Зеленый Л.М. и Согов Ж.-А., Ускоренные ионы в пограничном плазменном слое: пучки или потоки?., *Геомагнетизм и Аэронавтика*, 2009,9 послано в журнал

3.2.4. Наблюдения потоков плазмы во время онсетов суббурь.

В базе наблюдений проекта Кластер в хвосте магнитосферы за 2001-2007 гг отобраны 49 эпизодов наблюдений тонкого токового слоя заканчивающихся всплеском активности (онсетом). Онсеты определялись как появление потоков плазмы, уменьшение плотности поперечного тока или возрастание B_z после периода локального спокойствия с признаками фазы накопления. Онсеты на удалении 17–20 R_E от Земли сопровождалась в основном потоками направленными в хвост. В зоне 11–17 R_E доминировали потоки направленные к Земле, однако в предполночном секторе встречались оба направления потоков. Скорости потоков направленных от Земли были часто довольно малы, в пределах 200-300 км/с. Мы интерпретируем такие потоки как последствия всплесков пересоединения происходящих на вытянутых силовых магнитных линиях плазменного слоя (замкнутых). Часть онсетов не сопровождалась выраженными потоками (более 100 км/с). Плотность поперечного тока была в среднем больше в вечерней и полуденной зонах хвоста.

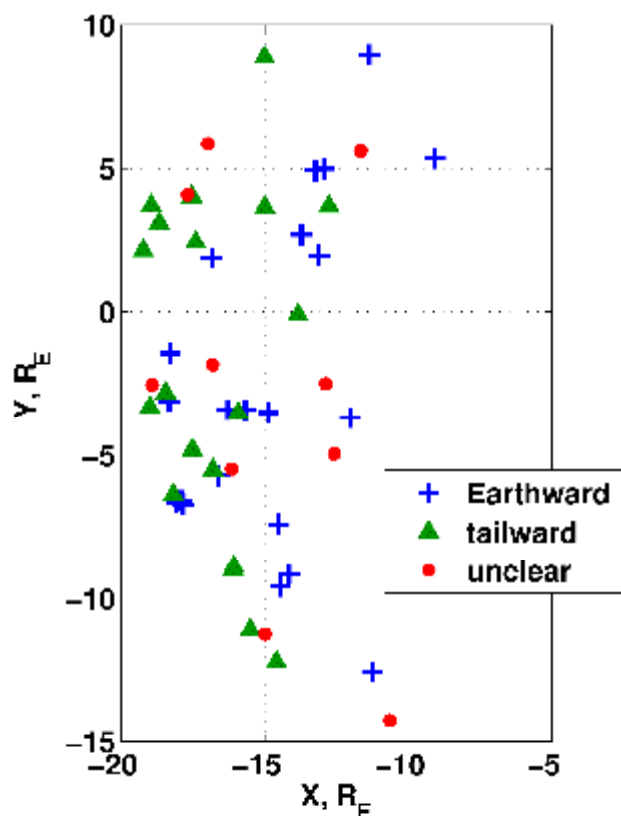


Рисунок: Распределение направлений потоков плазмы в зависимости от места онсета.

Petrukovich, A. A., W. Baumjohann, R. Nakamura, and H. Reme, Tailward and earthward flow onsets observed by Cluster in a thin current sheet, *J. Geophys. Res.*, 114, A09203, doi:10.1029/2009JA014064, 2009

3.2.5. Зависимость компоненты Ву магнитного поля в плазменном слое магнитосферы Земли от ориентации диполя: статистическая модель и экстремальные значения.

С использованием 11 лет наблюдений проекта Геотейл построена модель магнитной компоненты Ву в плазменном слое хвоста магнитосферы. Модель включает зависимость от межпланетного поля, координат в хвосте и ориентации диполя (в системе GSM). В полуночном и предполуночном секторах Ву положительно коррелирует с наклоном диполя (положительным в летний сезон). Таким образом, летом наблюдаемое распределение Ву сдвинуто в сторону положительных значений, а зимой – в сторону отрицательных. Максимальное приращение Ву из-за этого эффекта может достигать нескольких нТ. На утренней стороне эффекта зависимости от ориентации диполя не наблюдается, за исключением околоземной зоны (в пределах 15 радиусов Земли), где отмечен слабый обратный эффект. Зависимость Ву от наклона диполя может порождаться рядом причин. Похожий эффект был ранее замечен при анализе ионосферной конвекции. Кроме вышеописанного статистического отклика, довольно часто наблюдались экстремальные значения Ву (более 5 нТ и больше соответствующей компоненты межпланетного поля). Они составляют до 20-25 % случаев во время солнечного максимума в предполуночном секторе. Такие значения не могут быть объяснены статистической моделью и требуют наличия некоторого механизма усиления.

A.A.Petrukovich Dipole tilt effects in plasma sheet By: statistical model and extreme values Ann. Geophys., 27, 1343–1352, 2009

3.2.6. Вариабельность спектров низкочастотных магнитных колебаний в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли.

Исследована динамика частотных спектров магнитных флуктуаций в диапазоне ниже 1 Гц в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли. Проанализированы специально отобранные интервалы многочасовых непрерывных наблюдений плазменного слоя спутником Геотейл. Спектры могут быть в целом описаны степенным законом спада с двумя изломами. Диапазон частот между изломами приблизительно 0.2-0.02 Гц имеет наиболее стабильный показатель спада мощности от частоты порядка 2.4-2.6. Показатели на более высоких и более низких частотах более вариативны. Выше 0.2 показатель составляет порядка 3, но флуктуации сильно локализованы. На низких частотах показатель составляет порядка 1.5. Комбинация показателей наклона (альфа) в частотных спектрах и спектрах длины (дельта, фрактальная размерность) должна следовать формуле $\alpha + 2 \cdot \delta = 5$, но на самом деле в среднем составляет более 5.5.

Petrukovich A.A. and D.V. Malakhov, Variability of magnetic field spectra in the Earth's magnetotail, Nonlinear processes in geophysics, подано в журнал октябрь 2009.

3.2.7. Механизм взрывной фазы магнитосферной суббури

Получены экспериментальные доказательства разработанного ранее механизма магнитосферной суббури, согласно которому уярчение ближайшей к экватору дуги полярного сияния происходит примерно за 1 мин. до начала магнитных возмущений. Приведен анализ результатов наблюдений динамики полярных сияний во время изолированной геомагнитной суббури с использованием данных телевизионных наблюдений, полученных в ПГИ РАН. Выделено событие, при котором первое уярчение дуги во время суббури имело место непосредственно в зените станции. Показано, что перед началом уярчения не наблюдалось каких либо возмущений к полюсу от уярчающейся дуги. Уярчение дуги началось с появления яркой точки. Временная

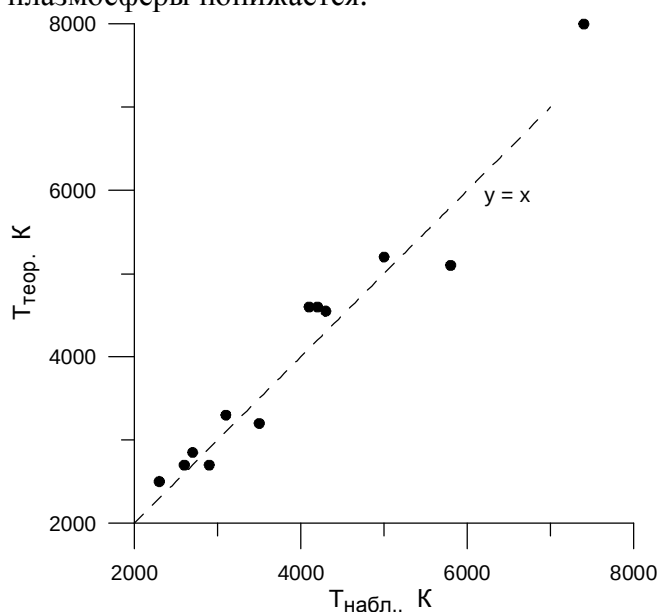
задержка между моментом начала уярчения и началом магнитных возмущений составляла 40 с. Проведено сравнение результатов наблюдений с предсказаниями теорий начала взрывной фазы суббури. Показано, что результаты наблюдений не описываются как теорией пересоединения в хвосте (не наблюдается каких либо возмущений дуг к полюсу от уярчающейся дуги), так и теорией разрыва тока хвоста в ближней части плазменного слоя (существует задержка между моментом уярчения и началом магнитных возмущений). При этом полученные результаты хорошо согласуются с развитой в группе ранее теорией взрывной фазы суббури, в соответствии с которой уярчение ближайшей к экватору дуги связано с развитием электростатической неустойчивости в области максимального вытекающего продольного тока.

Antonova E. E., I. A. Kornilov, T. A. Kornilova, O. I. Kornilov, and M. V. Stepanova, Features of auroral breakup obtained using data of ground-based television observations: case study, Ann. Geophys., 27, 1413-1422, 2009.

Antonova E.E., I.A. Kornilov, T.A. Kornilova, O.I. Kornilov, S.S. Pulnits, S.S. Rossolenko, M. V. Stepanova, Isolated substorm expansion phase onset and the mechanism of auroral brightening, IAGA-2009 abstracts, Sopron, Hungary, 23-30 August 2009, 302-MON-00900-0044.

3.2.8. Поведение температуры ионов на ночной стороне плазмосферы во время геомагнитных бурь.

По измерениям на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и МАГИОН-5 показано, что на ночной стороне плазмосферы на главной фазе умеренных магнитных бурь температура ионов плазмосферы понижается.



Сравнение температуры в плазмосфере, наблюдавшейся во время геомагнитных бурь на спутнике Магион 5 вблизи геомагнитного экватора, с температурой рассчитанной на основе значений, измеренных до начала бури.

Предложенное объяснение наблюдавшегося эффекта связано (1) с уменьшением магнитного поля при развитии магнитной бури и (2) с дополнительным его уменьшением вследствие перемещение дрейфовой оболочки протонов от Земли. Проведено сопоставление температур протонов, рассчитанных по модели, исходя из значений температур, измеренных до начала бури, с температурами в плазмосфере, наблюдавшимися во время бури. Показано, что построенная модель удовлетворительно описывает понижение температуры протонов вблизи экваториальной плоскости. Для объяснения уменьшения температуры в плазмосфере на средних широтах, по-видимому, необходимо привлекать другие механизмы.

Kotova G.A., M.I. Verigin, V.V. Bezrukikh, V.V. Bogdanov, On the outward drift of plasmaspheric ions during magnetic storms as a reason for temperature decreasing, XI Научная ассамблея МАГА, Шопрон (Венгрия), 23-30 августа 2009, 304-FRI-O1430-0219.

3.2.9. Динамика концентрации и температуры холодной плазмы в вечернем секторе плазмосферы в процессе развития магнитной бури

Подробно исследована динамика концентрации и температуры холодной плазмы в вечернем секторе плазмосферы в процессе развития магнитной бури 27-29.02.1997 г. Измерения во время бури 27-29.02.1997г. В вечернем секторе плазмосферы (20-22MLT) так же, как и в ночном в процессе развития магнитной бури секторе резко падает температура ионов. Однако, на более поздней фазе развития бури в вечернем секторе наблюдалось повышение ионной температуры до величин, превышающих величины температур, характерных для магнитно-спокойных периодов. Это интерпретировалось ранее как следствие взаимодействия потоков энергичной плазмы, которые могут вторгаться в плазмосферу во время магнитных бурь, с холодной плазмой плазмосферы. Во время фазы восстановления бури 27-29.02.1997 в глубине плазмосферы (в области $2.4 < L < 3.4$) были впервые зарегистрированы потоки электронов с $E > 40$ eV, что подтверждает правильность интерпретации причин повышения температуры ионов на поздней фазе развития магнитной бури, сделанных ранее.

Безруких В.В., Котова Г.А., Веригин М.И., Динамика температуры и концентрации ионизированного водорода в плазмосфере во время геомагнитных бурь по данным Аврорального зонда. Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 17–20 февраля 2009 г., ИКИ РАН, Секция «Магнитосфера», с.7.

3.2.10. Характеристики полярного ветра на высотах ~20000 км.

По данным прибора Гиперболоид установленного на спутнике Интербол-2 были получены характеристики полярного ветра на высотах ~20000 км. До последнего времени основным источником данных и характеристик полярного ветра были измерения на спутнике Акебоно, и все модели оттока ионосферных ионов в полярной шапке сравнивались с этими измерениями. Однако на больших высотах в полярной шапке могут наблюдаться потоки ионов нагретых в каспе/клефте. В результате в предыдущих работах характеристики полярного ветра на средних высотах оказывались завышенными из-за некачественной фильтрации данных и плохо согласовались с модельными расчетами.

В данной работе были отобраны только те периоды измерений, когда полярный ветер мог быть обнаружен с наибольшей вероятностью. Оказалось, что над освещенной полярной шапкой обнаруживается два типа оттока ионов, которые могут быть отнесены к полярному ветру. В одном случае скорости ионов O^+ были достаточно высоки, чтобы ионы долетели до детектора (в разреженной плазме спутник приобретает положительный потенциал, препятствующий детектированию низкоэнергичных ионов), в другом скорости O^+ не хватало на преодоление положительного потенциала спутника. После тщательного анализа функций распределения ионов было показано, что в первом случае температуры ионов H^+ были как минимум в два раза выше, а скорости и температура ионов O^+ в несколько раз выше модельных расчетов.

	Измерения на <i>Интербол-2</i> <i>Лето 1997 г.</i>	Модель TUBE-7 <i>Минимум солнечной активности</i>
N_H	0.5-2 см ⁻³	0.6 см ⁻³
V_H	21 км/сек	23 км/сек
T_H	$T_{ }=3500$ К $T_{\perp}=2000$ К $T_{ }=6500$ К $T_{\perp}=5500$ К <i>Tun 1</i><i>Tun 2</i>	2500 К
N_{He}	очень мала	0.15 см ⁻³
V_{He}	14 км/сек	10 км/сек

T_{He}	7500 K	2500 K
N_O	0.1 см^{-3}	0.4 см^{-3}
V_O	5 км/сек	1 км/сек
T_O	10000 K	1000 K

Полученные данные говорят о том, что в полярной шапке существуют потоки полярного ветра, которые согласуются с существующими моделями. Одновременно на полярной шапкой встречаются потоки исходящих ионов, которые были разогреты и ускорены на высотах ниже 18000 км. Механизм этого ускорения пока неизвестен.

Чугунин Д.В. Характеристики восходящих потоков тепловых ионов в полярной шапке по данным спутника *ИНТЕРБОЛ-2*, Космические Исследования, том 47, № 6, 2009.

Chugunin D. Ion distribution function characteristics of the polar wind on ~20000 km altitudes. IAGA-2009 abstracts, Sopron, Hungary, 23-30 August 2009, 303-FRI-01415-0202O0945-0031.

3.2.11. Теоретическое и экспериментальное исследование структуры кинетических токовых слоев.

При помощи численной самосогласованной модели тонкого токового слоя в бесстолкновительной плазме хвоста магнитосферы Земли с постоянной поперечной компонентой магнитного поля B_z (метод крупных частиц) исследован один из возможных механизмов формирования несимметричной квазиравновесной конфигурации слоя, который связан с асимметрией образующих слой источников плазмы на его периферии. Для случая максимально возможной асимметрии, когда токовый слой образован только одним источником, получены квазиравновесные конфигурации слоя, в которых соотношения равновесного силового баланса выполнены с высокой точностью. В этих конфигурациях по сравнению с симметричным случаем токовый слой смещается в сторону от источника, но профиль плотности тока по форме остается близким к симметричному. Проведено сопоставление этих конфигураций с полученными ранее конфигурациями в аналитической модели тонкого токового слоя. Сравнение показало, что обе модели дают результаты, согласующиеся не только качественно, но и количественно.

Исследована кинетическая структура вложенных тонких горизонтальных слоев (по данным спутников CLUSTER). Плотность тока, оцененная с помощью курлометра, в целом согласуется с суммарными электронным и протонным токами. Вложенность наблюдаемых тонких токовых слоев в широкий плазменный слой можно оценить из профилей плотности тока. Показано, что ионные функции распределения состоят из двух составляющих: холодного недрейфующего «ядра» (по всей видимости, принадлежащего фоновым частицам плазменного слоя), в то время как горячие асимметричные «крылья» формируют частицы – носители основного тока в системе. Ионы кислорода (если они присутствуют) и высокоэнергичные «хвосты» функции распределения могут вносить вклад до 30% в полный ток. Проведено сравнение профилей плотности тока через слой с тремя моделями токовых слоев. Показано, что модели, учитывающие вложенность токового слоя, описывают наблюдаемые в эксперименте токовые структуры одинаково хорошо, на уровне экспериментальной точности.

Профили 22 тонких токовых слоев, исследованных четырьмя спутниками Cluster в хвосте магнитосферы Земли, сравнены с самосогласованной моделью анизотропного одномерного токового равновесия, рассмотренного в приближении квазиadiaбатических ионов и замагниченных электронов. Чтобы оценить ионные масштабы токовых слоев, использованы данные Cluster с 2001 по 2004 годы, когда пространственное разделение кораблей составляло от 2000 до 1000 км, в то время как характеристики электронных масштабов исследованы с помощью данных Cluster за 2003 год, когда разрешение спутников составляло 200 км. Полученные из модели ионный и электронный пики плотности тока, вложенные в окружающую плазму, успешно воспроизводят наблюдаемые

профили. Критерий устойчивости токового слоя в модели также согласуется с экспериментом.

Мингалева О.В., И.В. Мингалева, Х.В. Малова, Л.М. Зеленый, А.В. Артемьев, Несимметричные конфигурации тонкого токового слоя с постоянной нормальной компонентой магнитного поля, «Физика плазмы», 2009, т.35, №1, 83-93.

Зеленый Л.М., Х.В. Малова, В.Ю. Попов, Д.Ш. Делькур, А.А. Петрукович, А.В. Рунов, Многомасштабные асимметричные токовые слои в бесстолкновительной магнитосферной плазме, Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. (2008) 122-123.

Artemyev A.V., A. A. Petrukovich, L. M. Zelenyi, R. Nakamura, H. V. Malova, and V. Y. Popov, Thin embedded current sheets: Cluster observations of ion kinetic structure and analytical models, Ann. Geophys., 27, 4075–4087, 2009, www.ann-geophys.net/27/4075/2009/

Artemyev V., A. A. Petrukovich, L. M. Zelenyi, H. V. Malova, V. Y. Popov, R. Nakamura, A. Runov, and S. Apatenkov, Comparison of multi-point measurements of current sheet structure and analytical models, Annales Geophysicae, 26, 2749–2758, 2008, www.ann-geophys.net/26/2749/2008/ © European Geosciences Union 2008.

3.2.12. Моделирование возмущений магнитного поля при конвекции плазмы в магнитосфере земли.

Увеличение конвекции плазмы в магнитосфере Земли приводит к увеличению давления плазмы во внутренней магнитосфере. Изменение давления плазмы за счет магнитосферно–ионосферных связей приводит к искажению крупномасштабного электрического поля конвекции. Наличие плазмы приводит также к изменению магнитных полей. Для численного моделирования использовалась численная модель, похожая на модель RCM. В отличие от нее, численно рассчитывалось самосогласованное магнитное поле и давление плазмы. Для этого использовалось приближение магнитостатического равновесия. Данная модель описывает формирование несимметричного кольцевого тока, ионосферные и продольные токи, крупномасштабные электрические поля конвекции и магнитное поле.

Показано, что при изменении магнитного поля в плоскости экватора возникают изолинии постоянного магнитного поля, которые не окружают Землю.

Vovchenko V. V., E.E. Antonova, Magnetic field distortion in the process of plasma convection in the magnetosphere of the Earth: Preliminary results of modeling, Proceedings of the 32th annual seminar, 3-6 марта 2009 г., Apatitu, Russia, 2009, in press

Вовченко В.В., Е.Е. Антонова, Моделирование возмущений магнитного поля при конвекции плазмы в магнитосфере Земли, Конференции «физика плазмы в солнечной системе» 17-20 февраля 2009 Г., ИКИ РАН, Сборник тезисов, с. 48.

3.2.13. Подготовка обзоров и справочных материалов по физике токовых слоев.

Представлен обзор в монографии, содержащей избранные обзорные доклады на конференции CAWSES (*Kyoto Symposium, 2007*). Обзор посвящен научным достижениям в физике токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли, которые основаны на результатах исследований спутников Geotail, Interball и Cluster. Структура и динамика очень тонких токовых структур, которые часто наблюдаются на ночной стороне земной магнитосферы, детально рассмотрены и обсуждаются. Подведены итоги развития теоретических моделей и идей, стимулом для которых явились экспериментальные исследования в земной магнитосфере (равно как и магнитосфер других планет), и охарактеризовано состояние дел в этой области физики в «до-ТЕМИС»-овскую эпоху.

В сборнике «Солнечно-земная физика» представлен обзор состояния исследований в области солнечно-земной физики, выполняемых космическими агентствами разных стран. Приводятся основные результаты действующих («Ulysses», SOHO, TRACE, RHESSI, «Hinode», STEREO) и завершенных («Коронас-Ф» и др.) миссий, научные цели и задачи подготавливаемых и планируемых космических проектов (SDO, «Solar Probe», «Solar Orbiter», «Резонанс»,

«Интергелиозонд» и др.). Космические проекты рассматриваются в контексте научной проблематики системы Солнце-Земля.

В монографии «Плазменная гелиогеофизика» сделан обзор структуры и динамики бесстолкновительных токовых конфигураций в магнитосферной плазме. Детально рассмотрены основные типы теоретических моделей токовых слоев (МГД, кинетические, численные), в частности, модели анизотропных токовых структур, которые обнаруживаются в процессе спутниковых наблюдений в магнитосфере Земли. Сделан обзор основных понятий о магнитном пересоединении в космической плазме, его проявлениях, свойствах и распространенности в природе.

Приняты к печати справочно-обзорные статьи в Большой Российской энциклопедии.

Сделан обзор методов моделирования магнитосферной плазмы, в частности, бесстолкновительных токовых слоев в магнитосфере Земли.

Zelenyi Lev, Helmi Malova, Anton Artemyev, Victor Popov, Anatoly Petrukovich, Dominique Delcourt, and Alexey Bykov, Magnetotail after Geotail, Interball and Cluster: Thin current sheets, fine structure, force balance and stability, Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES): Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium, Edited by T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M. A. Geller, pp. 121–170. TERRAPUB, Tokyo, 2009.

Кузнецов В.Д., Л.М. Зеленый, Космические проекты по солнечно-земной физике, сб. Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. (2008) 83-92, УДК 523, 550.3.

Малова Х.В., Зеленый Л.М., Структура и динамика «хвоста» магнитосферы, в кн. «Плазменная гелиогеофизика», в 2-х т., (Т. I, стр. 434-459) /под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского, М., Физматлит, 2008, 560 стр., ISBN 978-5-9221-1041-9.

Зеленый Л.М., Малова Х.В., Магнитное пересоединение, в кн. «Плазменная гелиогеофизика», в 2-х т., (Т. II, стр. 490-494) /под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского, М., Физматлит, 2008, 560 стр., ISBN 978-5-9221-1041-9.

Зеленый Л.М., Х.В. Малова, Ленгмюровские волны, Магнитозвуковые волны, МГД-неустойчивости, Микронеустойчивости плазмы, Затухание Ландау, Космическая плазма, Большая Российская энциклопедия, в печати, 2009.

Малова Х.В., и В.Ю. Попов, Энциклопедия «Математическое моделирование в низкотемпературной плазме», Тематический том VII-1, Глава 4, Математическое моделирование околоземных магнитоплазменных структур, под ред. В.Е.Фортова, Москва, с. 568-586, 2009, 658 с., ISBN 978-5-8037-0425-6.

3.2.14. Математическое моделирование тонкого токового слоя

Проведено совершенствование разработанной ранее математической модели тонкого токового слоя (ТТС) в хвосте магнитосферы с целью включить в модель электростатические эффекты с реальным отношением заряда к массе для электронов.

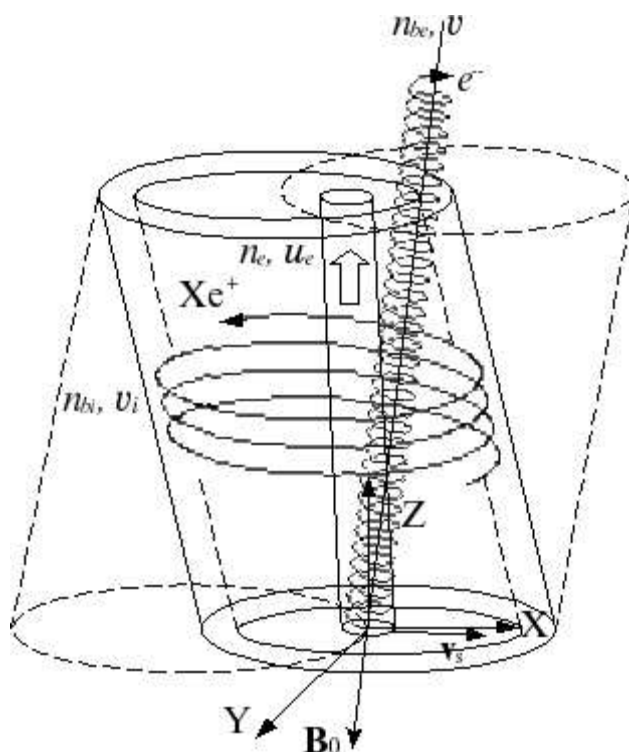
Проведенные расчеты показали, что при типичных условиях 1) электроны вносят достаточно малую поправку в профиль плотности тока и в полный ток поперек слоя по сравнению с током ионов; 2) влияние типичного электростатического поля на коллективное движение ионов (а также на профиль плотности тока и силовой баланс) достаточно мало; 3) среднее время нахождения в слое электронов имеет порядок нескольких секунд, что как минимум на порядок меньше этого показателя для ионов, равного нескольким минутам. Это позволяет в ходе моделирования квазистационарных конфигураций ТТС использовать метод расщепления по физическим процессам, который заключается в следующем. На начальном этапе устанавливается равновесие с учетом только ионов и магнитного поля на достаточно грубой «ионной» сетке. На втором этапе на более мелкой «электронной» сетке рассматривается чисто электростатическая задача движения электронов в ТТС при фиксированном магнитном поле и концентрации ионов. При этом самосогласованным является только электростатическое поле, и в начальный момент электроны имеют локально максвелловское распределение с концентрацией очень близкой к концентрации ионов. На третьем этапе полученное электростатическое поле и профиль плотности тока электронов усредняется и фильтруется на ионном временном и пространственном масштабе на «ионную» сетку. Вычисляется уточненное магнитное поле с учетом вклада электронов в плотность тока. На четвертом этапе снова решается задача получения «ионного» равновесия в заданном найденном ранее электрическом поле.

Далее этот процесс повторяется до достижения сходимости. При помощи этого метода получены квазистационарные конфигурации ТТС с учетом электронов.

О.В. Мингалева и др. (материал готовится к печати)

3.3. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами

3.3.1. Возбуждение ELF-ULF волн пучками заряженных частиц в активном эксперименте.



Проведен анализ результатов активного космического эксперимента с инъекцией вдоль магнитного поля вложенных друг в друга пучков электронов и ионов Xe^+ со спутника «Интеркосмос-25», сопровождавшейся наблюдениями заряженных частиц и волн на этом спутнике и на субспутнике «Магион-3». Во время эксперимента наблюдались значительные отрицательные импульсы потенциала спутника; плазменно-пучковый разряд не происходил. Нелинейная связь волн на частоте модуляции электронного пучка ω_m и медленных волн пространственного заряда привела к резонансному эффекту на нижней гибридной частоте ω_{LH} . Наиболее интенсивное возбуждение ELF-ULF волн наблюдалось на частотах соответствующих соотношению $|\omega_m - \omega_{\text{be}}|/\omega_{\text{LH}} \sim 1$.

Nikolay V. Baranets, Yackov P. Sobolev, Yuriy Ya. Ruzhin, Hanna Rothkaehl, Nikolay S. Erokhin, Valeriy V. Afonin, Jaroslav Vojta, and Jan Smilauer, Excitation of HF and ULF-VLF waves during charged particle beams injection in active space experiment, J. Plasma Fusion Res. Series, 8, 251-256, 2009.

3.3.2. Аналитические и численные исследования волновых процессов в плазмосфере на основе спутниковых данных.

В рамках этой темы выполнена следующая работа.

А). Исследовано новое явление в ОНЧ диапазоне, а именно, формирование клиновидных структур на обзорных спектрограммах, впервые наблюдавшееся на спутнике DEMETER. Формирование таких спектрограмм связано с особенностями распространения свистовых волн в плазмосфере, и специфической орбитой спутника DEMETER, который вращается по почти круговой орбите на высоте $\sim 700\text{—}660$ км, так что максимум профиля НГР частоты находится над спутником. Свистовые волны, возбуждаемые молниевыми разрядами в противоположном спутнику полушарии, распространяясь в плазмосфере Земли, переходят в квазирезонансный режим. Волны с частотами ниже максимума НГР на L -оболочке спутника отражаются в области, где их частота близка к частоте НГР, и не доходят до спутника, что ведет к появлению нижней частоты обрезания на спектрограмме. С другой стороны, волны с частотами выше максимума НГР в процессе своего

распространения в квазирезонансном режиме уменьшают свою L-оболочку, причем эта тенденция тем сильнее, чем выше частота волны, что и ведет к появлению верхней частоты обрезания на спектрограмме.

Shklyar D. R., M. Parrot, J. Chum, O. Santolik, E. E. Titova, On the origin of lower-and upper- frequency cutoffs on wedge-like spectrograms observed by DEMETER in the mid-latitude ionosphere. - to be published in JGR.

Б). Еще одно волновое явления, которое также наблюдалось на спутнике DEMETER и также стало предметом исследования в 2009 г. - это Магнитосферные Линейчатые Излучения (МЛИ). Его детальное описание содержится в работе:

Nemec F., M. Parrot, O. Santolik, C.J. Rodger, M. J. Rycroft, M. Hayosh, D. Shklyar, and A. Demekhov, Survey of magnetospheric line radiation events observed by the DEMETER spacecraft.- J. Geophys. Res. (2009), v. 114, A05203, doi:10.1029/2008JA014016.

В). Написан обзор, в котором изложена последовательная теория резонансного взаимодействия энергичных частиц со свистовой волной, распространяющейся под углом к магнитному полю в неоднородной магнитосферной плазме. Представлен вывод основных уравнений, описывающих динамику поля и частиц, при этом проанализирована зависимость характера резонансного взаимодействия от параметров задачи. При исследовании уравнений движения частиц последовательно использован гамильтоновский формализм. Рассмотрено два приложения теории: вычислен инкремент (декремент) волны, распространяющейся под углом к внешнему магнитному полю; и изучено высыпание протонов под действием сигналов ОНЧ передатчика. Обзор опубликован в журнале:

Shklyar David and Hiroshi Matsumoto, Oblique Whistler-Mode Waves in the Inhomogeneous Magnetospheric Plasma: Resonant Interactions with Energetic Charged Particles.- Surveys in Geophysics (2009), v. 30, pp. 55-104. DOI 10.1007/s10712-009-9061-7.

3.3.3. Изучение процессов переноса и нагрева частиц в волновых электрических и магнитных полях.

Исследуется ускорение частиц в турбулентных токовых слоях в экваториальном приближении. Результаты показывают, что механизм взаимодействия частиц с электромагнитными турбулентными полями может объяснить образование степенных энергетических распределений в плазме. Изучено соотношение между адиабатическим ускорением частиц в электрическом поле в присутствии стационарной турбулентности и ускорение в переменном электрическом поле при динамической турбулентности. Показано, что распределения скоростей частиц, формирующиеся в результате взаимодействия «частица-турбулентное поле», по сути, похожи на распределения, наблюдаемые вблизи областей пересоединения в магнитосферном хвосте.

Рассмотрены эффекты ускорения и переноса заряженных частиц в двухмерной конфигурации ансамбля электромагнитных волн с многомасштабной пространственно-временной структурой. Как ускорение частиц, так и их перенос имеют строго недиффузионный характер и сильную зависимость от топологии турбулентной компоненты магнитного поля. Обнаружено, что при прохождении потока частиц через ограниченную в пространстве область турбулентных динамических электромагнитных полей, в этой области формируется функция распределения частиц по скоростям со степенными крыльями типа «каппа - распределения». Построенное распределение по пространственным скачкам заряженных частиц сильно зависит от соотношения турбулентной и стационарной компонент магнитного поля. Так, в случае отсутствия регулярной компоненты магнитного поля распределение частиц по скачкам с ростом

скачков спадает медленнее распределений Леви. Результаты данной работы могут быть использованы для объяснения плазменного нагрева и энергизации в турбулентных токовых слоях, например, в хвосте магнитосферы Земли, а также для исследования плазменных процессов в короне Солнца.

Обнаружена возможность неограниченного ускорения нерелятивистских заряженных частиц медленными электромагнитными волнами и описан захват в режим такого ускорения. Проведены оценки вклада данного механизма в рост энергии заряженных частиц в земной магнитосфере.

Zelenyi Lev, Anton Artemyev, Helmi Malova, Alexander V. Milovanov, Gaetano Zimbardo, Particle transport and acceleration in a time-varying electromagnetic field with a multi-scale structure, *Physics Letters A*, 372, 6284-6287, 2008, doi:10.1016/j.physleta.2008.08.035, Elsevier.

Нейштадт А.И., А.В. Артемьев, Л.М. Зеленый, Д.Л. Вайнштейн, Серфотронное ускорение в электромагнитных волнах с малой фазовой скоростью, *Письма в ЖЭТФ*, Т. 89, вып. 9, с.528-534, 2009.

Artemyev V., L. M. Zelenyi, H. V. Malova, G. Zimbardo, and D. Delcourt, Acceleration and transport of ions in turbulent current sheets: formation of non-maxwellian energy distribution, *Nonlin. Processes Geophys.*, 16, 631-639, 2009, www.nonlin-processes-geophys.net/16/631/2009/.

3.3.4. Разработка методов расчета самосогласованных электромагнитных полей и параметров бесстолкновительной плазмы при локальных и волновых возмущениях в магнитосфере.

В рамках модели волны с захваченными электронами, осциллирующими на дне эффективных потенциальных ям, рассмотрена ее устойчивость при распространении в бесстолкновительной плазме вдоль внешнего магнитного поля. Дисперсионное уравнение, описывающее линейную стадию роста сателлитов, решается совместно с нелинейным дисперсионным соотношением первичной волны конечной амплитуды. Такой, согласованный, подход впервые позволил определить инкременты во всех предельных случаях, соответствующих различным режимам неустойчивости. Установленный скейлинг зависимости инкрементов от амплитуды вистлера и концентрации захваченных электронов обнаруживает общие закономерности развития неустойчивости. Вместе с тем, выявлены характерные особенности неустойчивости, обусловленные спецификой линейной дисперсии свистовых волн. В частности, показано, что экспоненциально нарастающая модуляция волны распространяется со скоростью самого вистлера, если его частота равна половине гирочастоты электронов. Эта аномалия в характере неустойчивости отчетливо коррелирует с известными данными наблюдений триггерирования свистовых волн в магнитосфере.

Основные результаты проведенной работы опубликованы в журнале “*Plasma Physics and Controlled Fusion*”, Vol. 51 (2009) 115011, были представлены на конференции “MCC-09” (ИКИ РАН, 23-25 ноября 2009 г.) и в кратком виде опубликованы в сборнике трудов данной конференции.

В свете обширного экспериментального материала по распространению свистящих атмосфериков в магнитосфере особого внимания заслуживает поведение неустойчивости при условии $\omega_0 = \omega_H/2$. Именно в этих условиях чаще всего, и наиболее отчетливо, проявляется явление триггерирования свистовых сигналов в радиационном поясе Земли. С другой стороны, проведенный анализ показывает, что в этих же условиях частоты неустойчивых сателлитов в системе отсчета, движущейся с фазовой скоростью первичной волны, обращаются в нуль, в противоположность случаю произвольного соотношения несущей частоты сигнала и гирочастоты электронов. Таким образом, если частота вистлера близка к половине электронной ларморовской частоты, экспоненциально нарастающая модуляция, обусловленная возбуждением сателлитов, покоится в системе, связанной с волной. В противном случае, модуляция имеет вид быстро бегущей волны огибающей. Трудный, для интерпретации экспериментальных данных, экспоненциальный характер процесса триггерирования в линейно устойчивой плазме также находит простое

объяснение с привлечением теории сателлитной неустойчивости. К более детальному сопоставлению экспериментальных данных и развитой теории неустойчивости вистлера с захваченными электронами предполагается приступить в 2010 году.

Проведены предварительные расчеты локализованного возмущения плазмы внешним телом. Эту работу, которая может иметь разнообразные практические приложения в физике космической плазмы, также предполагается продолжить в следующем году.

Красовский В.Л. Неустойчивости свистовой волны с захваченными электронами. Международная конференция MCC-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов, Изд-во "URSS", Москва, 2009, с.44-49.

3.3.5. Исследование направленного транспорта в стохастическом слое в системе с быстрыми и медленными масштабами скоростей. Исследование динамики электрона в параболической модели магнитного поля хвоста магнитосферы Земли при наличии электромагнитной волны. Серфотронное ускорение в электромагнитных волнах с малой фазовой скоростью. Исследование переходов через сепаратрису в модели прохождения через резонанс Фешбаха в газе ферми-атомов при малых начальных значениях адиабатического инварианта. Исследование динамики рассеяния сверхзвукового течения Бозе-Эйнштейновского конденсата на внешней примеси.

Проведено исследование динамики в системе, представляющей собой фундаментальную для физики модель маятника под действием медленно периодически меняющегося крутящего момента с нулевым временным средним значением. Такого рода системы возникают при исследовании транспорта заряженных частиц, транспорта броуновских частиц в пространственно-периодическом потенциале, а также в некоторых задачах биофизики. В фазовом пространстве системы имеется широкий стохастический слой. Для общего вида функции с нулевым средним, задающей крутящий момент, показано, что среднее смещение вдоль типичной траектории внутри стохастического слоя за очень большой интервал времени отлично от нуля. Таким образом, в системе имеет место направленный транспорт. Аналитически получена формула для средней скорости этого транспорта. Результаты численной проверки хорошо согласуются с аналитическими результатами. Работа опубликована в журнале Physical Review E.

Рассмотрено движение электронов в хвосте магнитосферы Земли под влиянием магнитного поля Земли и электромагнитной волны. Поскольку радиус ларморовского движения электронов много меньше минимального радиуса кривизны магнитных силовых линий, в отсутствие волны движение описывается адиабатической теорией ведущего центра. Движение может быть представлено как композиция быстрого ларморовского вращения и медленного периодического движения вдоль силовой линии между магнитными пробками; каждому из этих движений соответствует свой адиабатический инвариант (соответственно, магнитный момент и «продольный» инвариант). Исследовано влияние на динамику резонансов типа «волна-частица», когда проекция усредненной по ларморовскому вращению скорости частицы на направление волнового вектора совпадает с фазовой скоростью волны. Получены формулы для скачка «продольного» адиабатического инварианта при рассеянии на резонансе и для вероятности захвата в резонанс. Исследована пространственная структура областей, в которых возможен захват. На основе полученных формул продемонстрировано возникновение диффузии и хаотического перемешивания по значению «продольного» адиабатического инварианта. Показано, что частица, захваченная в резонанс, проходит сквозь магнитную пробку и движется вдоль магнитной силовой линии в направлении Земли до момента выброса из резонанса. По результатам работы подготовлена статья.

Обнаружена возможность неограниченного серфотронного ускорения нерелятивистских заряженных частиц медленными электромагнитными волнами и описан захват в режим такого ускорения. Рассмотрена область параметров, в которой существует эффект захвата и ускорения. Проведены оценки вклада данного механизма в рост энергии заряженных частиц в земной магнитосфере.

В работе исследовано течение Бозе-Эйнштейновского конденсата, испытывающего рассеяние на возмущающей примеси. Подобные эксперименты неоднократно проводились в последнее время в нескольких лабораториях. Получены асимптотические формулы, описывающие форму стационарных волновых пакетов, образующихся в данном течении. По результатам работы опубликована статья в *Physical Review A*.

Исследовано локализованное перемешивание в микрокаплях, равномернодвигающихся по действию силы тяжести и находящихся с электромагнитным полем, амплитуда которого периодически меняется со временем. Продемонстрировано, что в системе возникает перемешивание в окрестностях линий тока невозмущенной системы, частота движения на которых находится в резонансе с одной из частот модуляции электрического тока. Исследовано перемешивание при наличии в спектре модуляции амплитуды нескольких гармоник (синусоидальный и треугольный профили). Показано, что использование нескольких гармоник приводит к более полному перемешиванию при меньших амплитудах модуляции. Работа опубликована в журнале *Mechanics Research Communications*.

Вайнштейн Д.Л., А.А. Васильев, А.И. Нейштадт. Динамика электронов в параболическом магнитном поле в присутствии электростатической волны, *Физика плазмы*, т. 35, №12, 1102-1113 (2009).

Нейштадт А.И., А.В. Артемьев, Л.М.Зелёный, Д.Л.Вайнштейн. Серфотронное ускорение в электромагнитных волнах с малой фазовой скоростью, *Письма в ЖЭТФ*, т.89, №9, 528-534 (2009).

Leoncini X., A. Neishtadt, and A. Vasiliev. Directed transport in a spatially periodic harmonic potential under periodic nonbiased forcing, *Phys. Rev. E* 79, 026213 (2009).

Neishtadt A.. On stability loss delay for dynamical bifurcations, *Discrete and Continuous Dynamical Systems, Ser. S*, 2, 4 897-909 (2009).

Itin A. P. and P. Törmä. Dynamics of a many-particle Landau-Zener model: Inverse sweep, *Phys. Rev. A* 79, 055602 (2009).

Horng T.-L., S.-C. Gou, T.-C. Lin, G. A. El, A. P. Itin, and A. M. Kamchatnov. Stationary wave patterns generated by an impurity moving with supersonic velocity through a Bose-Einstein condensate, *Phys. Rev. A* 79, 053619 (2009).

Neishtadt A., A.Artemiev, L.Zelenyi, D.Vainchtein. Acceleration of ions and electrons by electromagnetic waves. Международная конференция MCC-09, Трансформация мод, когерентные структуры и турбулентность, Сборник трудов, с. 12-18 (2009).

3.3.6. Численное моделирование процессов ускорения зарядов в космической плазме локализованными в пространстве пакетами из электромагнитных волн конечной амплитуды.

Выполнены численные расчеты захвата и ультрарелятивистского ускорения заряженных частиц пакетами электромагнитных волн конечной амплитуды с плавной огибающей в космической плазме (механизм серфинга зарядов на волнах). Задача сведена к анализу нелинейного, нестационарного уравнения второго порядка для фазы одной из волн на траектории частицы, которое решается численно. Целью работы является исследование эффективности ускорения заряженных частиц волновым пакетом с плавной огибающей его амплитуды. Изучена временная динамика колебаний ускоряемого заряда в эффективном потенциале волнового пакета в зависимости от его пространственного размера. При захвате частиц в режим серфинга поперечные к внешнему магнитному полю компоненты импульса захваченной частицы увеличивались практически линейно с ростом времени, а поперечные (относительно внешнего магнитного поля) компоненты скорости заряда были практически постоянны. В расчетах рассмотрен вариант, когда совершив, например, один гирооборот (волновой пакет за это время еще не успел существенно

сместиться в пространстве) частица может при благоприятной фазе попасть в черенковский резонанс. В этом случае имеют место ее захват с последующим сильным ускорением. Согласно расчетам реализация черенковского резонанса частицы с пакетом требует достаточно малых отстроек компоненты скорости заряда вдоль направления распространения пакета от фазовой скорости. Из проведенного анализа следует необходимость более подробного последующего изучения возможности захвата и последующего ускорения частиц волновым пакетом после серии их гирооборотов во внешнем магнитном поле. Разумеется, что при этом частица должна находиться в зоне волнового пакета, где амплитуда волнового электрического поля выше порогового (для реализации серфинга) значения. Однако такая постановка задачи требует существенного увеличения времени вычислений в каждом варианте выбора исходных параметров задачи поскольку после серии гирооборотов заряда фаза волнового пакета на несущей частоте должна попасть в диапазон, благоприятный для захвата частицы в режим серфинга. На плоскости начальных данных область захвата частиц в режим ультрарелятивистского ускорения является достаточно широкой по начальной фазе волны на траектории заряда. Максимальная энергия ускоренных частиц возрастает пропорционально ширине локализованного в пространстве волнового пакета. Оптимальным условием резкого повышения эффективности серфотронного ускорения заряженных частиц является близость фазовой и групповой скоростей на несущей частоте пакета. Проведенное исследование представляет интерес для интерпретации экспериментальных данных по регистрации потоков релятивистских частиц в космических условиях включая околоземное пространство. В частности, как указывалось ранее, одним из возможных механизмов генерации космических лучей является серфинг заряженных частиц на электромагнитных волнах. В последующем анализе предполагается выполнить анализ параметров астрофизической плазмы и определить области, в которых данный механизм генерации ускоренных частиц наиболее вероятен.

Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Е.А. Кузнецов, Л.А. Михайловская. Серфинг релятивистских зарядов на электромагнитной волне с плавной огибающей амплитуды. Международная конференция MCC-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов, Изд-во "URSS", Москва, 2009, с.92-99.

Н.С.Ерохин, Н.Н.Зольникова. Особенности серфатронного ускорения зарядов на электромагнитной волне с плавной огибающей амплитуды в космической плазме. XLV Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии. Тезисы и доклады. Секции физики. М., РУДН, 2009, с.124-126.
N.Erokhin, N.Zolnikova, E.Kuznetsov, L.Mikhailovskaya. Nonlinear mechanism of charged particles acceleration in space plasma by finite amplitude electromagnetic wave packets. NEEDS 2009 Workshop. Book of Abstracts, Isola Rossa, Italy, 2009, p.102-103.

3.3.7. Исследование безотражательных режимов взаимодействия электромагнитных волн с плазмой при наличии мелкомасштабных неоднородностей.

На основе точно решаемой модели рассмотрено безотражательное взаимодействие поперечной электромагнитной волны с неоднородной плазмой, содержащей мелкомасштабные (субволновые) структуры, и возникновение в некоторых слоях солитоноподобных всплесков волнового поля с большим его усилением. Такие всплески возможны как для поперечной электромагнитной волны в плазме без внешнего магнитного поля, так и в случае поперечного (к внешнему магнитному полю) распространения электромагнитной волны в магнитоактивной плазме. Пространственный профиль волнового поля характеризуется рядом свободных параметров, определяющих, в частности, глубину модуляции диэлектрической проницаемости. Показано, что набор этих структур может быть весьма разнообразным. Возможно безотражательное прохождение падающей из вакуума волны через такие плазменные структуры. Рассмотрено также точное решение одномерной задачи о нелинейном просветлении неоднородного

волнового барьера при учете кубической нелинейности с генерацией солитоноподобных всплесков волнового поля.

Связь амплитуды поля электромагнитной волны с эффективной диэлектрической проницаемостью ϵ_{ef} описывается нелинейным уравнением и при безотражательном распространении весьма важен эффект сильной пространственной дисперсии ϵ_{ef} , обусловленной присутствием субволновых структур неоднородности плазмы.

N.S. Erokhin, V.E. Zakharov. Soliton-like splashes of the electromagnetic field during reflectionless wave propagation in the inhomogeneous plasma. Международная конференция MCC-09 "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность". Сборник трудов, Изд-во "URSS", Москва, 2009, с.164-169.

3.3.8. Неустойчивость релятивистского пучка электронов в киральной плазмоподобной среде.

Рассмотрено прохождение релятивистского пучка заряженных частиц через киральную плазмоподобную среду в отсутствие внешнего магнитного поля. Показано, что при учете малой киральности возможно черенковское взаимодействие пучка с плазмой и при определенных углах распространения электромагнитных поперечных волн относительно пучка реализуется неустойчивость, инкремент которой определяется параметром киральности. Благодаря киральности возбуждаемые пучком волны могут выходить из плазмы в вакуум. Таким образом влияние слабой киральности является принципиальным в задаче генерации поперечных электромагнитных волн релятивистским пучком заряженных частиц и в проблеме выхода возбуждаемого излучения из плазмы.

Г.В. Гах, Н.С. Ерохин. Неустойчивость релятивистского пучка заряженных частиц в киральной плазме. XLV Всероссийская конференция по проблемам математики, информатики, физики и химии. Тезисы и доклады. Секции физики. М., РУДН, 2009, с.122-123.

3.3.9. Продолжение работы по изучению природы, свойств и происхождения пучков почти моноэнергетических ионов (ПМИ) в спектрах энергичных частиц около границ магнитосферы Земли, открытых в эксперименте ДОК-2 (проект Интербол).

Пучки почти моноэнергетических ионов (ПМИ) в спектрах энергичных частиц вблизи границ магнитосферы Земли были открыты в эксперименте ДОК-2 на борту спутников Интербол-1 и -2 (более 1000 событий за 1995-2000 гг.). Это стало возможным благодаря рекордно высокому энергетическому разрешению и другим новым идеям, реализованным в нашей аппаратуре. Только спустя 10 лет после нашей первой публикации по ПМИ (Lutsenko V. N., Kudela K., Almost monoenergetic ions near the Earth's magnetospheric boundaries. *Geophys. Res. Letters*, 26, 3, 413-415, 1999) появилась работа (A. Klassen, et al., STEREO/SEPT observations of upstream particle events: almost monoenergetic ion beams, *Ann. Geophys.*, 27, 2077-2085, 2009), где сообщалось о регистрации 60 случаев наблюдения пучков ПМИ на космических аппаратах проекта СТЕРЕО.

В 2009 г. продолжалась работа по анализу и интерпретации данных по ПМИ. Был закончен статистический анализ основных характеристик пучков ПМИ:

- Места наблюдений, частота наблюдений, продолжительность событий,
- Значения энергий 3-х линий ПМИ, а также соотношение между ними,
- Ширина линий на половине высоты,
- Отношения между площадями линий протонов и альфа-частиц и сравнение их с соответствующими отношениями для солнечного ветра.

Здесь, как пример, приведено распределение для отношения площадей линий H^+ и He^{2+} . Для сравнения: среднее значение Np/Na в солнечном ветре ~ 20 .

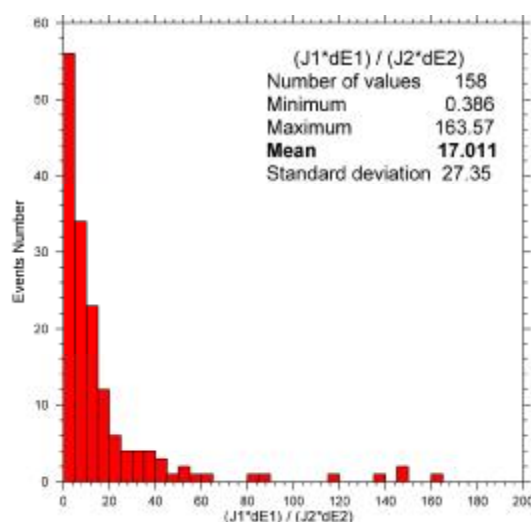


Рис. 1

Изучение свойств ПМИ на гораздо большей базе данных (~1000 случаев против ~40, рассмотренных ранее) подтвердило наши выводы о природе ПМИ, о процессе и месте их ускорения. Ионы ПМИ являются результатом ускорения ионов солнечного ветра в потенциальном электрическом поле, образующемся при разрыве волокон токового слоя околоземной ударной волны (ОЗУВ). Как было указано в нашем докладе на конференции ИКИ по плазме 17-20 февраля 2009 г.[3], разрыв может инициироваться взаимодействием токового слоя в солнечном ветре с ОЗУВ, приводящего к локальному отклонению потока солнечного ветра и образованию аномально горячего течения (HFA). Это препятствует поступлению потока солнечного ветра к небольшому участку ОЗУВ и образованию здесь носителей способных поддерживать первоначальный ток. Рис. 2 (из нашего доклада) иллюстрирует эту ситуацию.

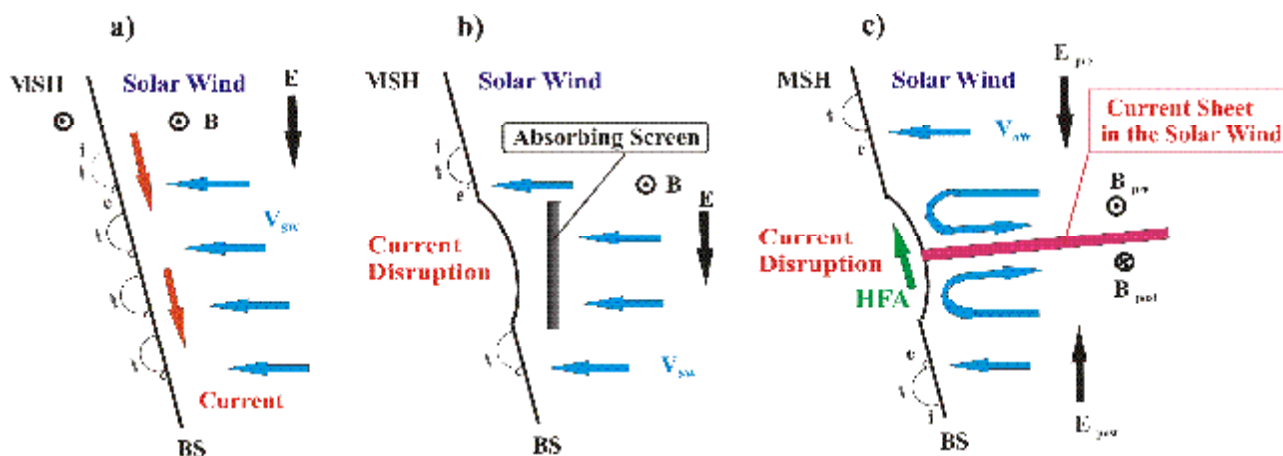


Рис. 2

Вместе с тем получено несколько новых результатов. В частности, для событий с высоким временным разрешением для спектров построены и объяснены временные зависимости энергии и интенсивности протонной линии. Дальнейший их анализ, возможно, позволит оценить ЭДС самоиндукции токовой цепи, а значит величину тока и длину токовых волокон. Результаты такого анализа для 6 ПМИ событий приведены на рис.3. Видно, что энергия E1 протонной линии состоит из 2 частей: постоянной и экспоненциально спадающей. Первая соответствует ЭДС токовой цепи до разрыва волокна, вторая – ЭДС самоиндукции цепи, зависящей от ее индуктивности (протяженности). Быстрый рост интенсивности линии J1 сразу после разрыва можно объяснить заполнением области ускорения плазмой из переходной области.

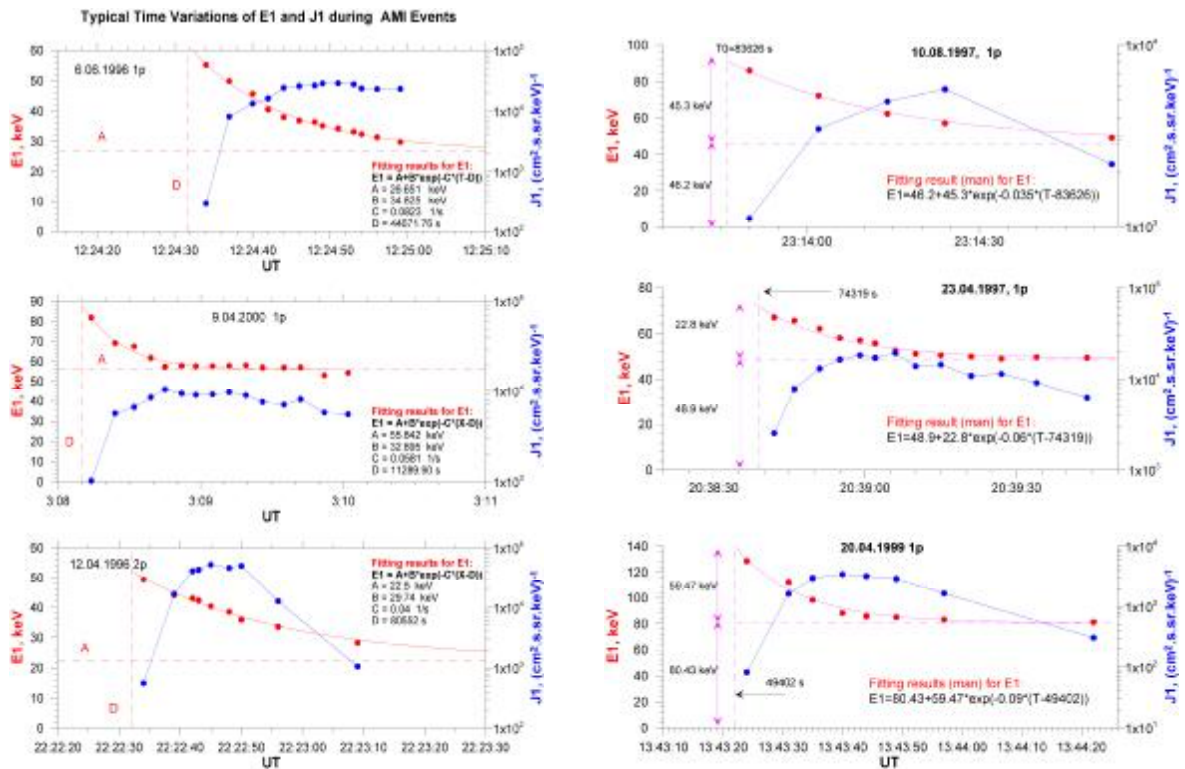


Рис. 3

Начато изучение корреляции между энергией протонной линии E1 и величиной конвекционного электрического поля солнечного ветра $|EF|$. Показано, что:

- имеется линейная зависимость E1 от $|EF|$,
- в некоторых событиях E1 оказывается вдвое больше, чем следует из этой зависимости, что можно объяснить повторным прохождением ионов через тот же ускоряющий промежуток.

В ряде случаев удалось определить угловые распределения энергичных ПМИ ионов и сравнить их с распределением для ионов с обычным гладким спектром. Были разработаны методы анализа и соответствующее программное обеспечение.

В качестве примера здесь приведены результаты для ПМИ события 23.04.1999 в магнитослое вблизи ОЗУВ. На рис. 4 представлен спектр ионов от 2p-телескопа, на котором цветами помечены 3 участка спектра (TP1, TP2, TP3), для которых временные вариации могут измеряться с высоким временным разрешением (до 1 с).

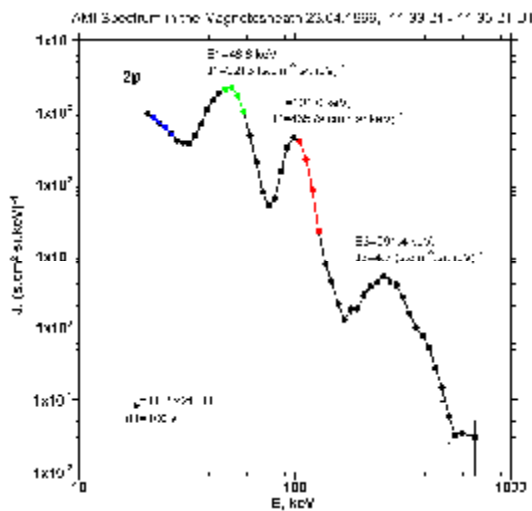


Рис.4

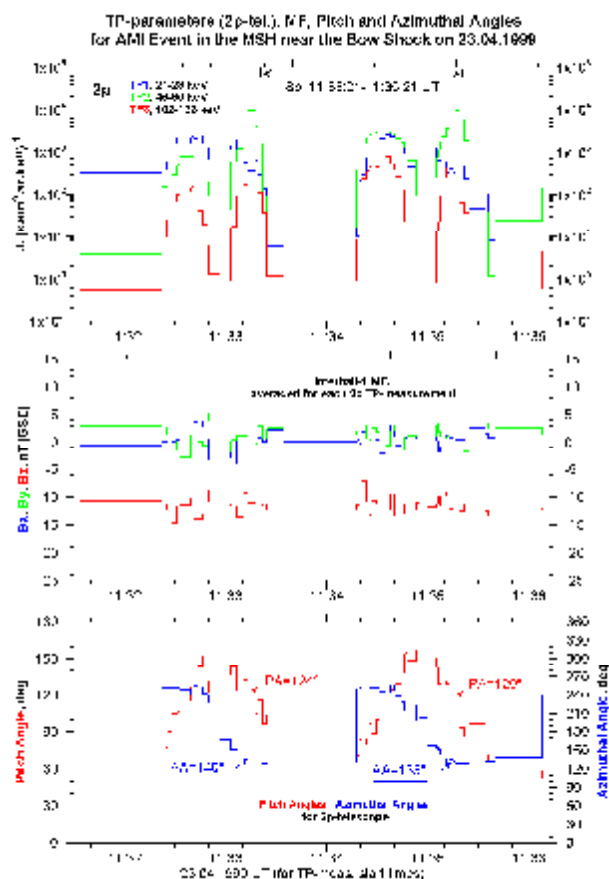


Рис. 5.

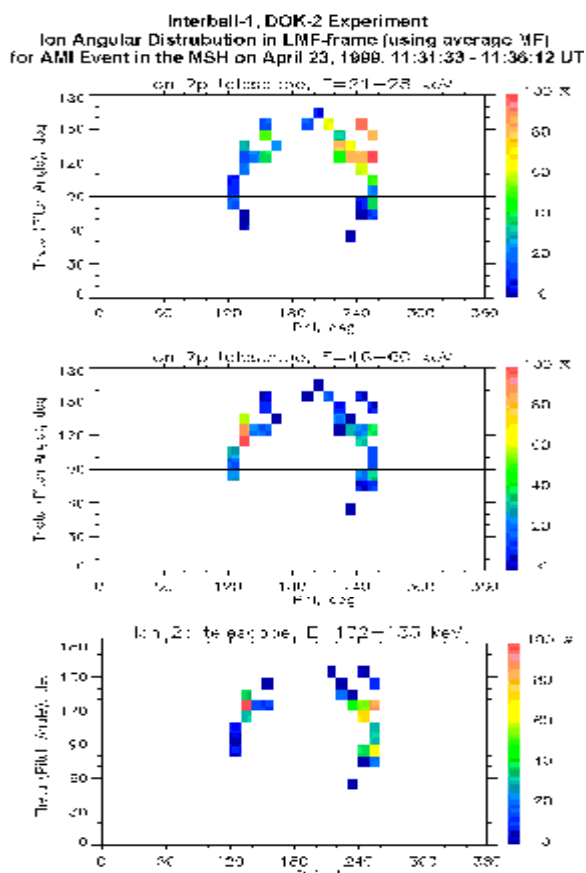


Рис. 6.

На рис. 5 приведены временные профили для этих параметров, магнитного поля и углов вектора потока в системе координат локального магнитного поля (LMF): питч угол и азимутальный угол. Использовались данные, усредненные для временных интервалов ТР. Из рис.4 видно, что ТР1 соответствует участку обычного спектра, тогда как ТР2 и ТР3 – двум первым линиям ПМИ. На рис. 5 вертикальные линии указывают время максимальной интенсивности ПМИ. Внизу определены для них значения питч угла и азимутального угла. На рис. 6 представлены суммарные угловые распределения за весь интервал времени. Видно, что угловое распределение для обычного спектра (верхняя диаграмма) более широкое, и углы для максимума интенсивности сильно отличаются от углов для ПМИ (питч угол равен 120-124°, а азимутальный угол 133-140°). Угловые распределения для пучков ПМИ оказались узкими ($\text{ПШПМ} < 20^\circ$) и негиротропными, что указывает на малые размеры области ускорения и кратковременность процесса. Хотя наша работа еще не закончена, она показала, что изучение пучков ПМИ вблизи ОЗУВ позволяет получить принципиально новую информацию не только о процессах ускорения энергичных частиц, но и о крупномасштабных свойствах и динамике токовых слоев в космической плазме.

Луценко В.Н., Гаврилова Е.А., Статистика свойств пучков Почти Моноэнергетических Ионов (ПМИ) вблизи околоземной ударной волны. ПМИ - как источник новой информация о динамике и свойствах токовых слоев., Конференция ИКИ по плазме 17-20 фев., 2009.

3.3.10. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами

Исследованы возможные механизмы формирования понижающихся тонов в динамическом спектре свистовых волн, генерируемых в магнитосфере Земли энергичными электронами при реализации режима лампы обратной волны (ЛОВ) в магнитосферном циклотронном мазере. Как показано ранее, этот режим позволяет объяснить многие особенности хоровых КНЧ-ОНЧ излучений в магнитосфере, в частности, генерация элементов с дискретным частотным спектром, характеризующихся большим инкрементом неустойчивости и быстрым дрейфом частоты. Проанализированы результаты численного решения упрощенной системы нелинейных уравнений, описывающих динамику магнитосферной ЛОВ в предположении малого КПД взаимодействия волн и частиц. Найдено, что генерация понижающихся тонов имеет место в случае, когда область генерации смещается от экваториальной плоскости (минимума геомагнитного поля) в сторону, противоположную движению энергичных электронов. При этом резонансные электроны в процессе генерации движутся в сторону уменьшения геомагнитного поля, поэтому их продольная скорость увеличивается, что соответствует уменьшению частоты циклотронного резонанса. В качестве двух механизмов смещения области генерации от экватора рассматриваются (1) увеличение линейного инкремента неустойчивости (например, за счет роста концентрации энергичных частиц) и (2) сохранение фазовой группировки частиц, возвращающихся в область генерации за счет баунс-осцилляций. Показано, что оба эти механизма могут привести к формированию понижающихся тонов, причем свойства генерируемых излучений (скорость дрейфа частоты, характерный интервал следования элементов) оказываются различными. Первый механизм действует, согласно расчетам, при потоках энергичных частиц, в несколько раз превышающих потоки, необходимые для генерации повышающихся тонов; формируемые при этом излучения имеют значительно большую частоту следования дискретных элементов и скорость дрейфа частоты в элементе по сравнению с растущими тонами. Второй механизм, по-видимому, может действовать в случае, когда размер области генерации вдоль магнитного поля близок к характерному размаху баунс-осцилляций резонансных электронов. Он реализуется при тех же потоках энергичных частиц, но при большей плотности фоновой плазмы, чем генерация повышающихся тонов; по сравнению

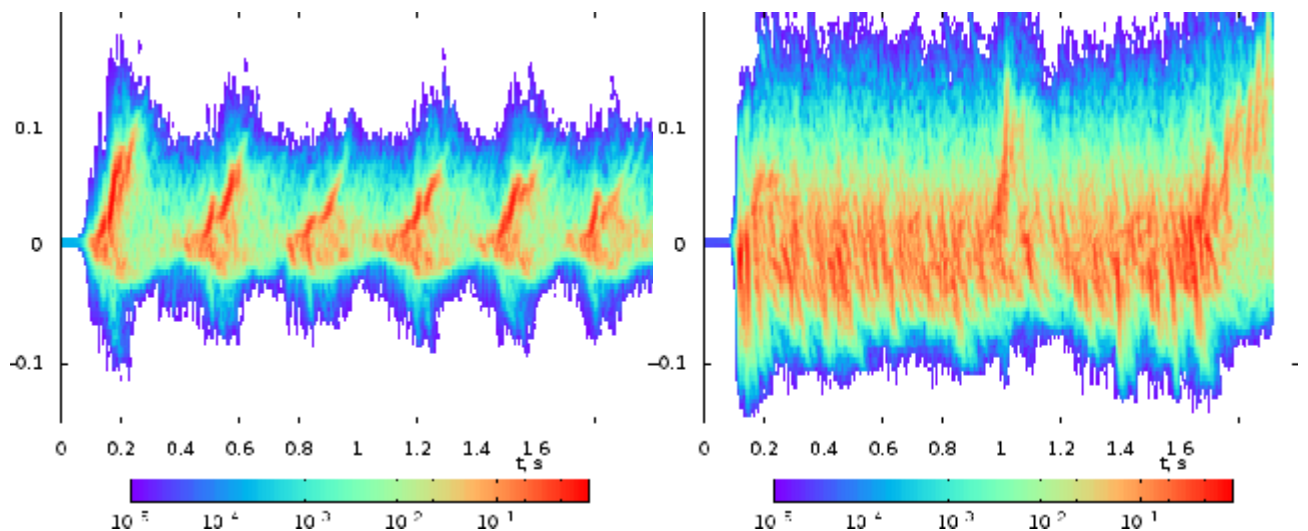


Рис. 1: Динамические спектры выходного сигнала в магнитосферной ЛОВ при разных значениях превышения потока энергичных электронов S над порогом генерации S_{thr} (слева — $S/S_{thr} = 10$, справа — $S/S_{thr} = 60$). По вертикальной оси отложен нормированный сдвиг частоты $\Delta\omega/\omega_B$, ω_B — гирочастота электронов. Смена повышающихся тонов понижающимися происходит при достаточно большом превышении порога генерации ($S/S_{thr} = 30-60$). При этом понижающиеся тоны следуют с довольно малым характерным интервалом. Расчеты проведены для концентрации фоновой плазмы $N_c = 10 \text{ см}^{-3}$, $L=4,4$, для сопоставления с результатами наблюдений на спутниках Cluster

с растущими тонами, излучения с понижающейся частотой в этом случае имеют близкие параметры, но несколько меньшую амплитуду и меньший период следования элементов.

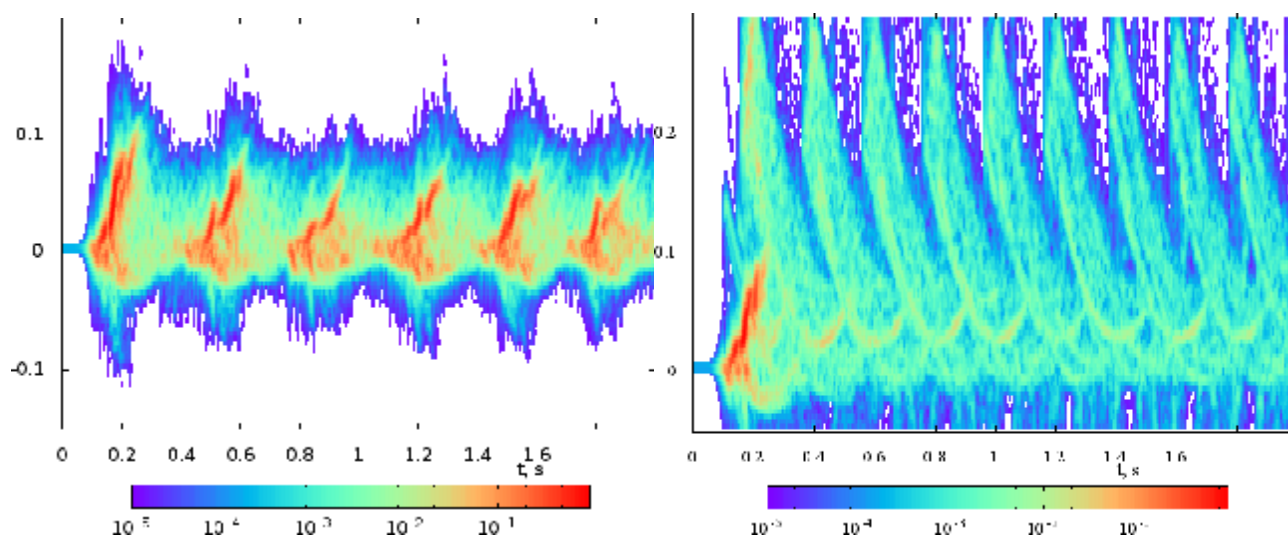


Рис. 2: Динамические спектры выходного сигнала в магнитосферной ЛОВ при одинаковых значениях превышения потока энергичных электронов S над порогом генерации S_{thr} ($S/S_{thr} = 10$), но разных граничных условиях для энергичных частиц. Спектр справа получен при изменении граничных условий для энергичных частиц на «периодические»: на вход области взаимодействия поступают частицы с фазовой группировкой, отвечающей вышедшим из этой области частицам. По вертикальной оси отложен нормированный сдвиг частоты $\Delta\omega/\omega_B$, ω_B — гирочастота электронов. Расчеты проведены для концентрации фоновой плазмы $N_c = 10 \text{ см}^{-3}$, $L=4,4$, для сопоставления с результатами наблюдений на спутниках Cluster

Беспалов А. А., Демехов А. Г. О линейной теории режима лампы обратной волны в магнитосферном циклотронном КНЧ–ОНЧ лазере // Изв. вузов — Радиофизика. — 2009. — Т. 52. — В печати.

Демехов А. Г. О генерации ОНЧ излучений с повышающейся и понижающейся частотой в магнитосферном циклотронном лазере в режиме лампы обратной волны // Изв. вузов — Радиофизика. — Направлено в печать.

Demekhov A. G. Nonlinear dynamics of a magnetospheric VLF backward-wave oscillator: possible influence of bounce oscillations of energetic electrons // Тез. Докл. XXXII Апатитского семинара «Физика авроральных явлений». — ПГИ КФ РАН, 2009. — С. 36.

Bespalov A. A., Demekhov A. G. Generalization of the linear theory of absolute instability of whistler-mode waves in the Earth's magnetosphere // Тез. докл. XXXII Апатитского семинара «Физика авроральных явлений». — ПГИ КФ РАН, 2009. — С. 36.

Demekhov A. G. Modeling of the generation of VLF chorus emissions in the Earth's magnetosphere // Abstracts of International Conference "Plasma-wave processes in the Earth's and planetary magnetospheres, ionospheres, and atmospheres". — Н.Новгород: ИПФ РАН. — С. 6.

Demekhov A. G. Nonlinear dynamics of a magnetospheric VLF backward-wave oscillator: Possible influence of bounce oscillations of energetic electrons // Abstracts of XIIth Scientific Assembly of IAGA. — Sopron, Hungary: IAGA, 2009. — P. 307–TUE– P1700–0327.

3.3.11. Наблюдения искусственных пульсаций во время нагревных экспериментов на установке SPEAR

Серия экспериментов по нагреву ионосферы на установке SPEAR проводилась в 2006 году. Для изучения искусственных эмиссий в диапазоне магнитных пульсаций Pc1 использованы данные магнитометра обсерватории Баренцбург. Достаточно большое число экспериментов позволило провести изучение зависимости событий генерации эмиссий от магнитной активности. Численная модель генерации магнитных пульсаций при модулированном нагреве ионосферы [Belova et al., 1995; Pashin et al., 1995] предсказывает линейную зависимость амплитуды пульсаций от величины ионосферного электрического поля. На рисунке 4 показано распределение числа интервалов нагрева от

К-индекса магнитной активности и числа успешных экспериментов, то есть интервалов нагрева, когда на спектрограмме магнитных вариаций наблюдались эмиссии на частоте модуляции нагревного передатчика. Очевидно, что явной зависимости вероятности генерации искусственных пульсаций от магнитной активности не наблюдается.

Для более детальной проверки зависимости параметров эмиссий от электрического поля в ионосфере были рассмотрены два события 11 июля 2006, временной интервал 15:50:50 - 16:50:32 UT и 12 июля 2006, временной интервал 05:31:52 - 06:30:02 UT. Спектрограмма Н-компоненты вариаций магнитного поля 11 июля показана на рисунке 5. На довольно зашумленном фоне отчетливо видны возмущения на частоте 3 Гц. Обращает на себя внимание отсутствие искусственных пульсаций в середине интервала нагрева с 16.10 до 16.20 UT. Конвекция в районе арх. Шпицберген по данным радара SuperDARN также представлена на рисунке 5. В отличие от нестационарного поведения интенсивности искусственных эмиссий режим конвекции достаточно устойчивый как по величине, так и по направлению. Устойчивый режим генерации пульсаций наблюдался 12 июля 2006 года (рисунок 6). Здесь же показана конвекция для интервала этого эксперимента. Как видно из него, величина и направление ионосферного электрического поля значительно менялась в течение часового интервала.

Сопоставление режима генерации искусственных пульсаций и конвекции указывают на спорадический характер эмиссий в диапазоне Pc1, обнаруженный ранее в авроральной зоне [Bosinger et al., 2000]. Спорадический характер также подтверждается нагревом ионосферы 15 июля 2006 года, проводившийся в тот же временной интервал, что и эксперимент 12 июля. В обоих событиях К-индекс был равен 2, существенного отличия в профиле ионосферной плотности и ионосферном электрическом поле не ожидается, но отклик ионосферы на нагрев 15 июля, в отличие от 12 июля, не был зарегистрирован.

Для объяснения спорадического характера генерации искусственных пульсаций предложено возможное объяснение, связанное с влиянием на их амплитуду плотности нейтральной атмосферы (Пашин и Мочалов, 2009). Большая изменчивость возмущений проводимости, связанная с возмущениями плотности нейтральных компонент ионосферы, ожидается в экспериментах по нагреву электронов мощным наземным КВ передатчиком, как для условий бедной, так и развитой D области ионосферы. В условиях низкой электронной плотности изменения амплитуды эмиссий могут привести к исчезновению или появлению искусственного сигнала на спектрограмме магнитных вариаций.

Пашин А.Б., Мочалов А.А. Возмущения ионосферной проводимости в диапазоне магнитных пульсаций Pc1 при нагреве электронов мощным наземным КВ передатчиком. Направлена в Геомагнетизм и аэрономия, 2009.

3.3.12. Исследование волновых процессов и возмущений в магнитосфере Земли

А) Исследование событий 26.02.08 и 09.01.08 по данным TEMIS и техники инверсии магнитограмм.

Установлена последовательность (сценарий) основных процессов типичной магнитосферной суббури:

MRD® накопление в хвосте® MR1?® SCW/CD® DIP® MR2® DIP® фаза восстановления (1)

Сценарий (1) описывает следующее развитие суббури: 1. пересоединение на дневной магнитопаузе (MRD), 2. накопление плазмы и магнитного потока в геомагнитном хвосте, 3. пересоединение в ближнем замкнутом хвосте (MR1, не обязательно), 4. образование разрыва хвоста (CD) и токового клина суббури (SCW), 5. диполизация (DIP), 6. пересоединение в открытых долях хвоста (MR2), 7. повторная диполизация (DIP), и 8. фаза восстановления.

Принципиально новым в предлагаемом сценарии являются следующие положения.

а) Наличие MR1 не обязательно, что отличает данный сценарий от первого основного сценария, известного в современной литературе как Outside-In.

б) Образование токового клина суббури SCW служит причиной магнитного пересоединения MR2, а не наоборот, что отличает данный сценарий от второго основного сценария суббури, известного в настоящее время как Inside-Out.

В целом, предлагаемый сценарий открывает новое направление, заключающееся в синтезе двух основных альтернативных моделей суббури, которые определяли представления о магнитосферных возмущениях в последние четверть века.

Установлена последовательность основных процессов магнитосферной бури, создаваемой усиленным динамическим давлением солнечного ветра (Pd) при уже завершённой фазе накопления магнитной энергии в геомагнитном хвосте и высоких значениях южной компоненты ММП:

Скачок Pd® Скачок скорости MRD® CD/SCW/CW® MR2® Супербури.

Принципиально новыми элементами такой суббури являются следующие:

(а) Pd- возмущение описывается в терминах концепции стандартной суббури, где основными процессами являются три вида магнитного пересоединения.

(б) Наличие поступления энергии в магнитосферу при резком увеличении скорости магнитного пересоединения на дневной магнитопаузе (MRD) противоречит общепринятым представлениям о процессах начала активной фазы суббури и известных видов возмущений. В типичных суббурях это начало, наоборот, сопровождается падением скорости MRD и поступления энергии в магнитосферу.

Б) Вклад глобальных колебаний магнитосферы в магнитную возмущенность

Глобальные колебания магнитосферы возникают лишь при обтекании геомагнитного поля сверхскоростными потоками солнечного ветра. Естественно, что при этом магнитосфера находится в возмущенном состоянии, что характеризуется высокими значениями индексов Kp и AE. Известно, что индекс авроральной активности AE отражает поступление энергии солнечного ветра в высокоширотную магнитосферу и ионосферу за счет пересоединения на дневной магнитопаузе. Скорость пересоединения тем выше, чем больше направленная на юг компонента межпланетного магнитного поля, что соответствует высоким отрицательным значениям B_z ММП. Однако, как показывает анализ, глобальные колебания магнитосферы совсем не связаны с южной компонентой ММП. Такое противоречие наводит на мысль, не являются ли глобальные колебания магнитосферы сами по себе дополнительным каналом поступления энергии из солнечного ветра в магнитосферу? Чтобы проверить это предположение, были вычислены ожидаемые из модели пересоединения значения индекса AE_{est} для событий Pc5 и найдена разность $\Delta AE = AE - AE_{est}$. Положительные значения ΔAE соответствуют избыточному поступлению энергии в полярную ионосферу по сравнению с уровнем, обеспечиваемым пересоединением. Сравнение ΔAE с амплитудой колебаний Pc5 показало, что от события к событию картина меняется. Так, если во время бурь декабря и мая 2003 г. и марта 2004 г. имеется лишь общее соответствие избытка AE и интенсивности колебаний, то для события января 2005 г. корреляция между вариациями этих величин очень велика. В любом случае, связь вариаций ΔAE с изменениями интенсивности Pc5 очевидна. Это говорит о том, что либо сами глобальные колебания являются дополнительным фактором, который обеспечивает перенос энергии в полярную ионосферу, либо их генерация тесно связана с этим неизвестным фактором.

Таким образом, магнитосферные колебания являются, возможно, тем самым волновым каналом передачи энергии из солнечного ветра в магнитосферу, поиски которого давно ведутся. Однако физический механизм волнового канала пока не ясен. Это может быть и участие МГД-волн в процессах квазивязкого взаимодействия обтекающей магнитопаузу плазмы с магнитосферой, и пондеромоторные механизмы перераспределения и ускорения частиц, и стимулированное волнами прямое проникновение плазмы через магнитопаузу

(так называемые ФТЕ явления). Необходимы дальнейшие исследования, чтобы понять, какие из этих процессов играют действительно существенную роль в динамике магнитосферы.

В) Продольная структура полоидально-поляризованных альфвеновских волн в магнитосферной плазме конечного давления

С помощью аналитических и численных методов изучена продольная структура полоидально-поляризованных альфвеновских волн в магнитосфере при учете конечного давления, продольной неоднородности плазмы и кривизны силовых линий. Эффекты конечного давления особенно важны в приэкваториальном регионе, где плазменное давление имеет тот же порядок величины, что и давление магнитного поля. Показано, что в этой области может сформироваться область непрозрачности, где полоидальные альфвеновские волны распространяться не могут. Таким образом, формируются два практически несвязанных между собой резонатора для полоидальных волн, прилегающих к магнитосопреженным точкам ионосферы. Благодаря этому эффекту геомагнитные пульсации в северной и южной полусферах могут быть несвязанными между собой. Другим следствием этого эффекта является пекулярная структура магнитного поля волны: в областях с высоким давлением ее фундаментальная гармоника может иметь три узла, а не один, как в холодной плазме.

Mishin V. M., T. I. Saifudinova, Yu. A. Karavaev, M. A. Kurikalova, and A. D. Bazarzhapov. Spatial Distribution of the Field-Aligned Current Density in the Polar Ionosphere and the Contribution of Magnetosound Waves. // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, No. 7, pp. 153–160. © Pleiades Publishing, Ltd., 2009.

*Mishin V., Z. Pu, L. Saprionova, A. Bazarzhapov, Yu. Kuzminykh, X. Cao, and H. Zhang, Active Phase a Substorm as a Chain of Two types of Reconnection - in the Closed Plasma Sheet and in the Open Tail Lobes, // *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 49, No 8, pp 1– 6, 2009.

Karavaev Yu. A., L. A. Saprionova, A. D. Bazarzhapov, . I. Saifudinova, and Yu. V. Kuz'minykh, Energetics of the Magnetospheric Superstorm on November 20, 2003, // *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 49, No. 7, pp. 139–147, 2009.

Потапов А.С. Устойчивые геомагнитные пульсации и колебания магнитосферы. *Геофизические исследования*. Т.9. №4. С. 55–64. 2008.

Потапов А.С., А.В. Гульельми. О нелинейном смещении широтного профиля геомагнитных пульсаций Pc5. *Солнечно-земная физика*. Вып. 13. С. 43–46. 2009.

Potapov A.S., B. Tsegmed, and T.N. Polyushkina. Contribution of global Pc5 oscillations to magnetic disturbance during geomagnetic storms. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, No. 8.

Potapov A.S., A.V. Guglielmi. On a nonlinear displacement of the latitude profiles of Pc5 geomagnetic pulsations. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, Vol. 49, No. 8.

Mager, P.N., Klimushkin, D.Yu., Ivchenko, N., On the equatorward phase propagation of high-m ULF pulsations observed by radars, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, V. 71, pp. 1677–1680, 2009.

Mager P. N., D. Yu. Klimushkin, V. A. Pilipenko, and S. Schaefer, Field-aligned structure of poloidal Alfvén waves in a finite pressure plasma, *Ann. Geophys.*, V. 27, pp. 3875–3882, 2009

3.4. Динамика радиационных поясов Земли и Юпитера

3.4.1. Ожидаемые радиационные условия на трассе полета от Земли к Юпитеру и его спутнику Европе, а также вблизи этих планет.

Выполнена оптимизация базы данных о потоках энергичных протонов в межпланетном пространстве. Обнаружены и устранены различные погрешности и неточности в использовании имеющихся данных для построения расчетных моделей ожидаемых радиационных условий. Результаты новых оценочных расчетов могут быть использованы при планировании будущих космических миссий к этим планетам.

Гецелев И.В., Губарь Ю.И., Подзолко М.В., Веселовский И.С., Радиационные условия миссии к Юпитеру и Европе, *Астрономический Вестник*, 2009, Т.43, №2, С. 125-129.

3.4.2. Исследование формирования радиального распределения концентрации фоновой плазмы в дисках вращающихся магнитосфер планет-гигантов

А) Основной целью исследований на данном этапе выполнения проекта являлся анализ условий гидродинамической устойчивости диска фоновой плазмы во вращающихся планетарных магнитосферах с учётом особенностей взаимодействия плазменного диска с проводящей ионосферой планеты и распределения магнитосферной плазмы. В рамках указанных исследований обоснован выбор модели плазменного слоя. В частности, показано, что при энергии ионов менее 100 эВ и толщине плазменного диска порядка диаметра планеты (оба эти условия хорошо выполняются в средней магнитосфере Юпитера и в магнитосфере Сатурна) можно пренебречь влиянием кривизны силовых линий магнитного поля в диске и давления плазмы на развитие желобковой (перестановочной) неустойчивости под действием центробежной силы. В рамках системы уравнений магнитной гидродинамики получены общие выражения для возмущений концентрации плазмы и электрического потенциала в плоском слое плазмы с неоднородным по радиусу поперечным магнитным полем с учётом мультиионного состава фоновой плазмы и конечной интегральной проводимости планетарной ионосферы. В ходе применения полученных выражений к условиям магнитосферы Сатурна выявлен ряд вопросов, требующих дополнительных исследований. В частности, необходимо более детальное описание распределения ионного состава фоновой плазмы по магнитным оболочкам и механизмов его формирования как в диске, так и в области магнитной силовой трубки между диском и ионосферой, а также более точные оценки интегральной проводимости ионосферы. Выяснение указанных вопросов позволит сформулировать дисперсионное уравнение мелкомасштабных желобковых возмущений фоновой плазмы. Полагая, что плазма диска находится на пороге устойчивости по отношению к указанным возмущениям, можно определить пороговый радиальный профиль её концентрации с учётом стабилизирующего влияния электрической связи диска с проводящей ионосферой. Результаты исследования предполагается сопоставить с новыми результатами по распределению фоновой плазмы в магнитосфере Сатурна, полученными в ходе недавних космических миссий.

Давыденко С.С. О влиянии нетвердотельности вращения ионосферы на эффект планетарного электрического генератора // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2009. (направлено в печать).

Б) Как показывают проведённые ранее исследования, устойчивость плазменных дисков во многих случаях существенно зависит от характеристик ионосферной плазмы. С этой точки зрения исследование факторов, приводящих к возмущению параметров ионосферы, представляет отдельный интерес. К указанным факторам относятся, в частности, грозовые источники квазистационарного электрического поля. Для описания ионосферных токовых систем, обусловленных грозовыми источниками, нами разработана численная модель на основе уравнений токостатики, позволяющая рассчитывать поля и токи в атмосферном промежутке с произвольными аксиально-симметричными распределениями проводимости и плотности стороннего тока. Модель учитывает особенности строения грозовых источников, в частности высотный ход электрической проводимости в облаке и вертикальный профиль стороннего тока. В рамках модели определяется картина полей и токов как внутри, так и снаружи грозового облака и оценивается полный ток, текущий от вершины грозового облака к верхним слоям атмосферы. На примере земной атмосферы указанный подход был использован для моделирования электрических параметров нескольких мезомасштабных конвективных систем, для которых были реконструированы профили электрической проводимости и плотности стороннего тока. Определена плотность тока к верхним слоям атмосферы от различных частей конвективных систем,

установлено, что вклад модельной конвективной системы с радиусом 100 км в глобальную цепь может меняться от -20 до 45 А, что оказывает существенное влияние на проводимость верхних слоёв атмосферы.

Davydenko S.S., Marshall T.C., Stolzenburg M. Modeling the electric structures of two thunderstorms and their contributions to the global circuit // *Atmospheric Research*. 2009. V. 91. P.165–177.
doi:10.1016/j.atmosres.2008.08.006.

В) Рассмотрена самосогласованная осесимметричная задача о стационарных вращающихся конфигурациях плазмы вокруг намагниченной планеты с учетом истечения ионизованного газа. В качестве простой модели расширяющейся плазмосферы при условиях отсутствия и малости магнитного числа Рейнольдса рассмотрена задача о конфигурации и параметрах плазменной оболочки, состоящей из двух слоев: 1) внутренней части, ограниченной магнитной оболочкой $L = r / R \sin^2 J = L_*$ (r — расстояние от центра планеты, J — полярный угол, R — радиус планеты), где давление изотропно, а вращение азимутальное и твердотельное; 2) внешней части, в которой, наряду с нетвердотельным азимутальным вращением, имеет место радиальное движение среды, а давление плазмы анизотропно. С использованием ряда упрощающих предположений получено аналитическое решение нелинейной системы уравнений для плотности, радиальной и азимутальной скорости, давления и возмущений магнитного поля. Найденное решение соответствует адиабатическому расширению в радиальном направлении, непрерывности на границе плазмосферы $L = L_*$ угловой скорости вращения оболочки и скачку плотности и давления на этой границе. Для земных условий, как следует из полученного решения, граница плазмосферы $L_* \approx 6.6$. Отметим, что положение этой границы отвечает достаточно очевидному факту, что в приэкваториальной области сила тяжести не может компенсировать силу инерции из-за вращения, и частицы стремятся улететь на бесконечность.

Солдаткин А.О., Чугунов Ю.В. Модель расширяющейся плазмосферы // *Солнечно–земная физика*. 2008. Т. 2, вып. 12. С. 229–230, Изд-во: Ин-т солнечно-земной физики, Сиб. отд-ние РАН.

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

3.5.1. МГД волноводы в космической плазме.

Рассмотрены волноводные свойства двух характерных образований хвоста магнитосферы: плазменного слоя и токового (нейтрального) слоя. Изучена зависимость областей существования различных типов волноводных МГД мод (быстрых и медленных, объемных и поверхностных) и их дисперсионных характеристик от параметров волновода и получена полная качественная картина всей совокупности ветвей дисперсионной кривой. Учет конечного размера возмущений поперек направления распространения волны приводит к появлению дополнительных эффектов: изменению критических частот волноводов и возбуждению продольного тока на границах слоев. Представления о волноводных свойствах плазменного и токового слоев могут объяснить появление выделенных частот в спектре низкочастотных флуктуаций в хвосте магнитосферы. При спутниковых наблюдениях тип волноводных мод можно различить по спектральным свойствам и по приведенным фазовым соотношениям между осцилляциями плазмы и магнитного поля.

Mager P.N., D.Yu. Klimushkin, V.A. Pilipenko, and S. Schäfer, Field-aligned structure of poloidal Alfvén waves in a finite pressure plasma, *Ann. Geophys.*, 27, 3875-3882, 1432-0576/angeo/2009-27-3875, 2009.
Мазур Н.Г., Федоров Е.Н., Пилипенко В.А., МГД волноводы в космической плазме, *Физика Плазмы*, 2009 (послано в печать).

3.5.2. Моделирование потоков античастиц в магнитосферах Земли и других планет Солнечной системы.

Значительные потоки античастиц, захваченных в магнитосфере Земли, были предсказаны недавно в теоретических работах (Pugacheva et al., 2002 и др) и подтверждены в экспериментах AMS collaboration и Pamela. Антипротоны рождаются в основном от распада антинейтронов, генерированных во взаимодействиях космических лучей с веществом атмосферы планет Земля ($\sim 10^{15}$ /год) и Юпитер ($\sim 10^{18}$ /год). При расчете функции источника использовался компьютерный код ядерных реакций SHIELD (Dementyev&Sobolevsky, 1999) и учитывается радиальная диффузия и потери частиц при взаимодействии с атмосферой, лунами, пылью, etc. Источник антипротонов вокруг Сатурна преимущественно формируется за счет распада антинейтронов, образовавшихся во взаимодействиях космических лучей с веществом колец, которые инжектируют $\sim 10^{20}$ антипротонов в год в магнитосферу Сатурна.

В магнитосфере Земли баланс между источником, потерями и диффузией антипротонов приводит к образованию антипротонного пояса с максимумом потока ~ 4000 частиц/м²с⁻¹ на $L = 1.4$ и максимумом энергетического спектра при $E \sim 175$ МэВ. Магнитосферы Юпитера и Сатурна более сложны из-за многочисленных лун. Луны Сатурна действуют и как источники и как стоки частиц, поэтому Сатурн обладает множеством антипротонных радиационных поясов, разделенных положением лун. Пик потока 100 частиц/м²с⁻¹ принадлежит поясу, расположенному между орбитами спутников Сатурна Януса и Мимаса. Наибольший поток в поясах Юпитера ~ 10 частиц/м²с⁻¹ принадлежит поясу, расположенному внутри орбит его главных лун.

3.5.3. Возможная природа «второго следа» солнечных радиовсплесков III типа.

Одним из наиболее любопытных научных результатов был получен при анализе солнечных радиовсплесков третьего типа по измерениям на спутнике «Интербол-2» с привлечением данных, полученных на других спутниках.

Радиовсплески III типа – хорошо известное радиоизлучение, генерируемое пучком энергичных электронов, инжектируемых из внешних областей Солнца в межпланетную среду. Генерация происходит на локальной плазменной частоте и, следовательно, при удалении пучка от Солнца плотность последнего падает и частота излучения уменьшается. Механизм генерации радиовсплесков III типа впервые был предложен в работах В.Л. Гинзбурга и В.В. Железнякова.

Спектр большинства радиовсплесков, зарегистрированных на ИСЗ «Интербол-2», имеет классический характер – излучение начинается на высоких частотах и с задержкой, соответствующей распространению пучка, приходит излучение низких частотах. Однако встречаются радиовсплески с двумя спектральными следами (см. рис.1). Второй след также широкополосный, но гораздо короче первого и практически не диспергирован.

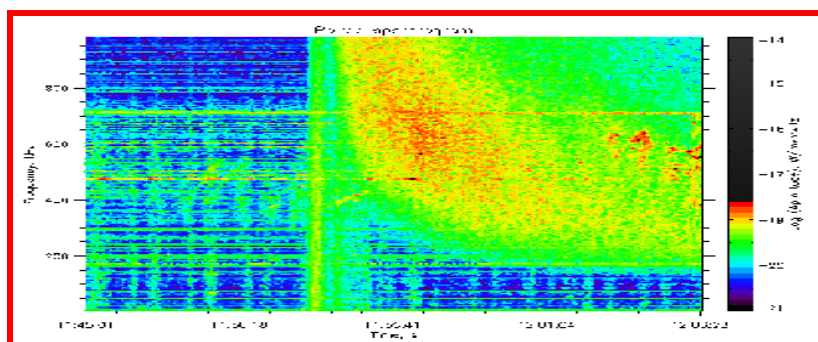


Рис.1.

Как правило, второй след наблюдается у сильных радиовсплесков, но большая амплитуда не является достаточным условием его появления. Число всплесков со вторым следом составляет $\leq 1\%$ от общего числа наблюдавшихся СРВ III типа.

Сравнение измерений на спутнике «Интербол-2» с аналогичными измерениями на спутниках «Поляр», «Винд» и «Геотейл» показали, что в тех случаях, когда по данным ИСЗ «Интербол-2» наблюдается второй след, то аналогичный след виден и на всех других спутниках. Из анализа спектра второго следа следует, что он не имеет особенностей на характерных плазменных частотах, что указывает на расположение источника вблизи точки наблюдения.

Сравнение времени появления СРВ со вторым следом с измерениями рентгеновского излучения на ИСЗ «ГОЕС» показали, что появление таких СРВ всегда совпадает с рентгеновскими вспышками (см. рис.2), а также с мелкомасштабными флуктуациями энергичных электронов солнечного происхождения.

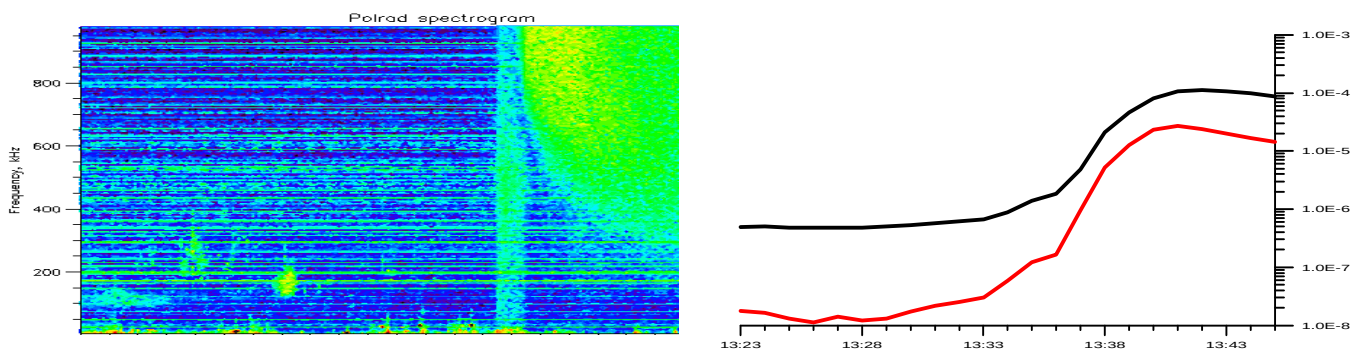


Рис. 2.

Хорошо известно, что рентгеновские всплески и часть СРВ III типа имеют один источник. Для объяснения полученных результатов авторы сделали предположение, что:

- В результате воздействия рентгеновского излучения на поверхность ИСЗ вокруг последнего образуется облако вторичных электронов;
- Налетающие на это облако пучки энергичных электронов в результате взаимодействия появляется переходное излучение, регистрируемое на ИСЗ.

Romantsova T.V., M.M. Mogilevsky, A.A. Skalsky, and J. Hanasz. Auroral Kilometric Radiation and Type III Solar Radio Bursts Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-5163, 2009, EGU General Assembly 2009.

Могилевский М.М., Т.В. Романцова, А.Б. Струминский, Я.Ханаш, Приемник высокочастотного излучения как детектор рентгеновского излучения Солнца? «Плазменные процессы в солнечной системе», Москва, 2009

3.5.4. Изучение механизмов генерации декаметрового радиоизлучения планеты Юпитер

Исследованы модуляционные особенности динамических спектров декаметрового радиоизлучения Юпитера, т.е. особенности, проявляющиеся в изменении интенсивности декаметрового излучения во времени и с частотой. Обнаружено, что практически все наблюдаемое излучение промодулировано с различными временными и частотными

масштабами, и была построена временная и частотная «иерархическая» структура динамических спектров. В частности, была обнаружена новая форма всплеска в виде отрезка синусоиды, длительностью около секунды и дрейфующего вниз по частоте. Было также отмечено, что тонкая структура в виде «модуляционных линий» всегда присутствует на динамических спектрах, полученных с разрешением около 100 мс. «Модуляционные линии» представляют собой систему наклонных полос повышенной и пониженной яркости. Наклон полос может быть как положительным, так и отрицательным.

Исследованы поляризационные особенности динамических спектров декаметрового радиоизлучения Юпитера с «модуляционными линиями». «Модуляционные линии» на динамическом спектре известны достаточно давно. Однако почти за сорок лет, прошедшие с момента их открытия (Gordon M. and Warwick K., *Astrophys. J.*, 148, 511-533, 1967), причины их возникновения так и не были найдены. В последнее время в качестве причины появления на динамическом спектре «модуляционных линий» обсуждается дифракция декаметрового радиоизлучения на неоднородностях плазменного тора Ио (Imai K., et al., *J. Geophys. Res.*, 102, 7127-7136, 1997). Согласно дифракционной гипотезе, за спутником Ио плазма возмущена. Возмущение представляет собой квазипериодическую систему полос повышенной и пониженной концентрации плазмы (относительно невозмущенной плазмы тора), вытянутых вдоль силовых линий магнитного поля планеты. Для декаметрового радиоизлучения, генерируемого в небольшой области вблизи поверхности планеты, эта система полос представляет собой дифракционный экран, после прохождения которого на динамическом спектре будут наблюдаться полосы, напоминающие «модуляционные линии». Наклон полос обусловлен движением наблюдателя относительно дифракционного экрана.

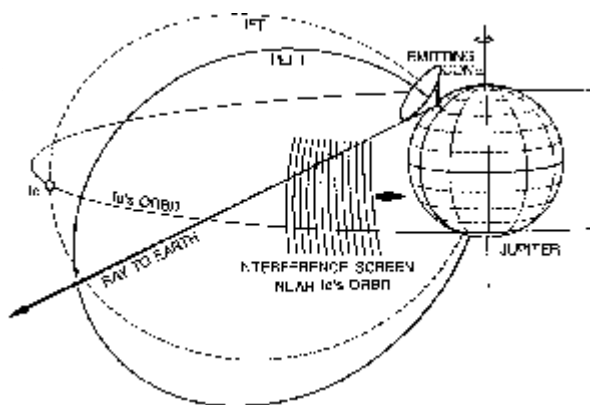


Рис. 3: Схематическое представление дифракционной модели происхождения "модуляционных линий"; IFT - магнитная силовая трубка, проходящая через спутник Ио; PEFT - активная магнитная силовая трубка, в которой находится источник наблюдаемого радиоизлучения.

На простом примере дифракции Фраунгофера в работе были изучены особенности, которые вносит в наблюдаемую поляризацию декаметрового излучения прохождение через дифракционный экран в плазменном торе Ио. Декаметровое радиоизлучение Юпитера имеет почти стопроцентную эллиптическую поляризацию с большой долей линейной компоненты. В плазменном торе Ио выполнены условия геометрической оптики и квазипродольного распространения волн. В этом случае эллиптически поляризованное излучение можно представить в виде суперпозиции когерентных между собой, но независимо распространяющихся необыкновенных (e) и обыкновенных (o) волн, примерно равной интенсивности, т.е. на дифракционный экран падают две волны,

обладающие круговыми поляризациями с противоположными направлениями вращения, каждая со своим показателем преломления. Показатели преломления этих волн отличаются на величину $\Delta n = |n_e - n_o| \ll 1$, n_e и n_o - показатели преломления необыкновенной и обыкновенной волн соответственно. После прохождения через дифракционный экран направления распространения указанных мод будут различаться на угол Δq^l ($l = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ К - порядок дифракционного максимума). В точке наблюдения для право- и лево-поляризованных составляющих декаметрового излучения соответствующие дифракционные линии смещаются относительно друг друга на расстояние $\Delta x^l = \Delta q^l \times R$, а по временной шкале динамического спектра излучения на

величину $\Delta t^l = \Delta x^l / V$, где R – расстояние от Юпитера до наблюдателя, V – компонента скорости наблюдателя относительно дифракционного экрана, ортогональная к направлению распространения излучения. В работе было показано, что относительное смещение соответствующих дифракционных линий зависит от угла дифракции и возрастает с его увеличением, т.е. наиболее заметное смещение должно наблюдаться в начале и конце всплеска излучения с «модуляционными линиями». Поскольку излучение, соответствующее необыкновенным и обыкновенным волнам, имеет круговую поляризацию с противоположным направлением вращения, то поляризация излучения с «модуляционными линиями» будет отличаться от поляризации всплеска без «модуляционных линий». Для условий, характерных для плазменного тора были сделаны оценки указанных величин. Для дифракционных максимумов, достаточно удаленных ($\tan q^l \approx 1$) от центрального максимума имеем $\Delta q_l \approx 1,5 \times 10^{-6}$ рад, $\Delta x_l \approx 10^8$ см, $\Delta t_l \approx 30$ с, что позволяет рассчитывать на обнаружение изменений в поляризации «модуляционных линий».

Litvinenko, G. V., Lecacheux A., Rucker H.O., Konovalenko A.A., Ryabov B.P., Taubenschuss U., Vinogradov V.V., Shaposhnikov V.E. Modulation structures in the dynamic spectra of the Jovian radio emission obtained with the high time-frequency resolution. *Astron. Astrophys.* 2009. V.493. P. 651-660.

3.5.5. Изучение количественных моделей некоторых коллективных процессов в планетарных магнитосферах и космической плазме

Выполнены модельные расчеты параметров радиационных поясов, взаимодействующих с низкочастотными электромагнитными волнами, в стационарных и нестационарных условиях. Достижения в теоретической проработке этого круга вопросов дали возможность предложить некоторые новые методы диагностики параметров магнитосферной плазмы по свойствам электромагнитных излучений ОНЧ диапазона. Рассмотрена предварительная модель особенностей замыкания частичного кольцевого тока в окрестности дневного плазмосферного выступа.

Проанализирован вопрос о формировании мелкомасштабных каверн плотности с нестационарным электрическим полем, которые регистрируются в земной авроральной магнитосфере. Показано, что вероятной первопричиной формирования каверн служат превышающие пороговые значения продольные квазистатические электрические токи и токи кинетических альвеновских волн. Рассмотрены актуальные варианты линейной и нелинейной стадий неустойчивости возмущений плотности. Установленные свойства параметров мелкомасштабных каверн плотности и нестационарного электрического поля согласуются с известными экспериментальными данными.

Изучены некоторые свойства квазилинейного взаимодействия свистовых волн и планетарных электронных радиационных поясов. Показано, что при подходящих условиях, самое важное из которых касается угловой зависимости мощности источника частиц, квазилинейная релаксация может приводить к разбиению шумового ОНЧ – излучения на отдельные сравнительно короткие электромагнитные импульсы. Импульсы повторяются периодически и по своим временным и частотным характеристикам похожи на фрагменты кратных свистов, но в отличие от последних повторяются периодически без характерного частотной эволюции от импульса к импульсу. На Рис.4 показан пример расчетного динамического спектра ОНЧ излучений. Отметим, что короткопериодические ОНЧ – излучения с периодом повторения

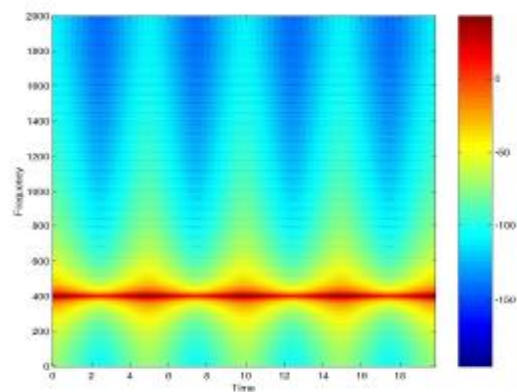


Рис. 4:

На Рис.4 показан пример расчетного динамического спектра ОНЧ излучений. Отметим, что короткопериодические ОНЧ – излучения с периодом повторения

спектральных элементов от 2 до 7 секунд действительно наблюдаются в космических и наземных экспериментах.

Беспалов П.А. Некоторые новые возможности диагностики магнитосферы по характеристикам свистовых излучений // Геомагнетизм и аэрономия, 2009 (направлена).

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Беспалов П.А. Выступы плазмосферы и вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэрономия, 2009 (направлена).

Беспалов П.А., Мизонова В.Г. Формирование каверн плотности с нестационарным электрическим полем в зоне авроральных продольных токов. Геомагнетизм и аэрономия, 2009 (направлена).

Bespalov P.A., Parrot M., Manninen J. Short-periodic VLF emissions as solitary envelope waves in a magnetospheric plasma maser // JASTP, 2009 (направлена).

Bespalov P. A. Resonance interaction of whistler emissions and geomagnetic pulsations. Abstracts of Space Weather Conference, Bruges, Belgium, 16-20th November 2009.

Беспалов П.А., Савина О.Н. Влияние ионно-звуковой турбулентности на формирование температурного перепада в переходной области солнечной атмосферы // Тезисы докладов Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2009", Санкт-Петербург: ГАО РАН, 2009. С.17.

Mansfeld D. A., Vodopyanov A. V., Golubev S. V., Demekhov A. G., Shalashov A. G. Observations of pulsed regimes of electron cyclotron instabilities in a mirror confined plasma produced by ECR discharge. // Abstracts of International Conference "Plasma-wave processes in the Earth's and planetary magnetospheres, ionospheres, and atmospheres". — Н.Новгород: ИПФ РАН, 2009. С. 32.

Gushchin M., Korobkov S., Kostrov A., Strikovskiy A., Starodubtsev M. Basic plasma physics experiments and modeling of space phenomena on large inductively coupled magnetoplasma devices. // Abstracts of 10th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS), Sweden, Djurö, June 8-12, 2009.

3.5.6. Предварительный анализ потоков тепла, частиц и волн в плазме с ионно-звуковой турбулентностью.

В рамках модельных расчетов показана возможность возбуждения ионно-звуковых колебаний потоками тепла в плазме. Обсуждается вероятное влияние ионно-звуковых колебаний на формирование температурных перепадов при критических потоках тепла. Величина критического потока тепла соответствует известным экспериментальным данным о потоке тепла через переходную область солнечной атмосферы. К настоящему времени накоплено достаточно много результатов по изучению неустойчивости ионно-звуковых колебаний в космической плазме. Вычисление инкремента неустойчивости проводилось для различных условий. Обычно изучались неустойчивости потоков частиц. В рамках данной работы показано, что неустойчивость ионно-звуковых колебаний может реализоваться и при отсутствии потоков частиц. Такая ситуация имеет место при прохождении через плазму потока тепла. Естественно, при наличии потока тепла есть определенная неоднородность среды. Длина волны ионно-звуковых колебаний, часто сравнимая с радиусом Дебая, предполагалась малой по сравнению с масштабом неоднородности среды. Поэтому при расчете инкремента неустойчивости использовалось приближение локально однородной среды.

Беспалов П.А., Савина О.Н. Поток тепла как источник ионно-звуковых колебаний в переходном слое солнечной атмосферы // Письма в АЖ. 2009. Т. 35, №5. С. 382–388.

Беспалов П.А., Савина О.Н. Влияние ионно-звуковой турбулентности на формирование температурного перепада в переходной области солнечной атмосферы // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2009", Санкт-Петербург: ГАО РАН, 2009 (в печати).

Гущин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В., Стриковский А.В. Генерация квазистационарных и низкочастотных токов и магнитных полей при взаимодействии свистовых волн с замагниченной плазмой. // Тезисы докладов конференции «Физика плазмы в солнечной системе», г. Москва, 17-20 февраля 2009 г., с.82

3.5.7. Антенные методы диагностики электромагнитных излучений в плазме солнечного ветра, в магнитосфере и ионосфере Земли.

В 2009 году была продолжена разработка методов активной и пассивной волновой диагностики параметров и электромагнитных полей в неравновесной плазме.

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. В случае шумового поля рассчитан квадрат спектральной плотности мощности шумовой ЭДС на терминале приемной антенны в такой неравновесной среде в зависимости от частоты излучения и параметров плазмы. Показано, в частности, что в аналоге формулы Найквиста для квазистационарных шумов на частотах много больше плазменной частоты электронов может стоять эффективная температура в виде кинетической энергии упорядочного движения электронов, а сопротивление определяется пролетными потерями электронов, налетающих на антенну со скоростью потока. На частотах порядка плазменной частоты неравновесные шумы определяются эффективными потерями на излучение в нормальные и аномальные доплеровские гармоники. В случае падения регулярного излучения рассчитано средне-квадратичное напряжение на терминале антенны как функция частоты излучения и углов прихода. Показано, что эффективная длина приемной антенны может сильно отличаться от «геометрической» длины диполя, что связано с особенностью дисперсии продольных волн, когда в заданное направление прихода энергии излучения в переизлученное поле дают вклад много (в асимптотическом пределе континуум) плоских волн. Особенно это существенно для нормальных доплеровских частот на частоте, близкой к плазменной, и углов прихода излучения вдоль скорости потока.

Результаты вычислений применялись для объяснения экспериментальных данных волновых экспериментов в ионосфере Земли и в плазме солнечного ветра.

В частности, отклик антенны на спорадические квазигармонические излучения в плазме солнечного ветра позволяет диагностировать локальную плазменную частоту и скорость ветра. На рис. 1 изображен отклик антенны на локальной плазменной частоте.

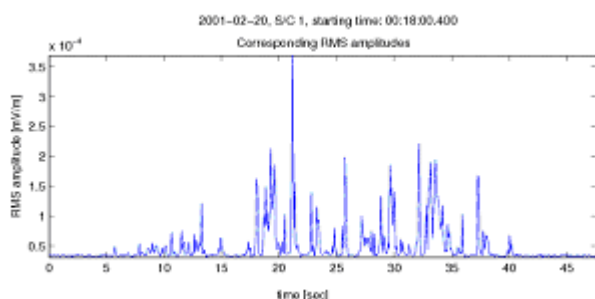


Рис. 1: Плазменные волны, регистрируемые антеннами спутников CLUSTER II в солнечном ветре при пролете области, занятой спорадическим излучением вблизи локальной плазменной частоты электронов

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.

Чугунов Ю.В., Фиала В. Резонансный зонд в движущейся плазме // Известия вузов. Радиофизика (в печати).
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 // Solar Wind 12 Conf. in St Malo, AIP (American Institute of Physics) Conference Proceedings (в печати).

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. Результаты ИЗМИРАН по проекту « Исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра»

А) Выполнено исследование вклада магнитосферной конвекции в формирование ночной субавроральной ионосферы при низкой геомагнитной активности.

Важность вклада магнитосферной конвекции в перераспределение ионосферной плазмы субавроральных широт в период роста геомагнитной активности хорошо известна. Наиболее ярким примером такого события является поляризационный джет, открытый группой Ю.И. Гальперина, с которым связано формирование так называемых узких провалов ионизации, т.е. узких по широте очень сильных уменьшений концентрации электронов на высотах области F-ионосферы. Поляризационный джет и связанные с этим джетом изменения в ионосфере были рассмотрены на предыдущих этапах работ в рамках данной темы.

При продолжительной низкой геомагнитной активности поляризационный джет на субавроральных широтах не образуется. Тем не менее даже в этих условиях вклад магнитосферной конвекции в формирование главного ионосферного провала (ГИП), включая локализацию, глубину и форму этого провала, может быть существенным.

На основе моделирования получено, что этот вклад существенно зависит от степени:

а) смещения границы горячих ионов в экваториальной плоскости магнитосферы к Земле относительно границы высыпания авроральных электронов (такое смещение в вечерние и околополночные часы существует даже при продолжительной низкой геомагнитной активности);

б) освещенности данной и магнитосопряженной ионосферы, поскольку величина электрического поля конвекции зависит от интегральной (вдоль всей силовой линии) проводимости ионосферы.

в) рассогласования географических и геомагнитных координат в области ГИП, из-за электрического поля магнитосферной конвекции как от геомагнитных, так и географических координат.

Поэтому из результатов моделирования следует, что для типичных средних условий ночью в равноденствие вклад электрического поля магнитосферной в формирование ГИП на долготах 270-300E оказывается более существенным, чем на противоположных долготах (90-120E). Как следствие, в этот сезон в ночные часы ГИП наиболее отчетлив на долготах 270-300E. Эта же ситуация сохраняется и для зимы, но в этот сезон концентрация минимума ГИП более низкая на долготах 90-120E из-за особенностей освещенности ионосферы.

Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными. Для этого использованы данные сети ионосферных станций и данные спутника СНАМР, по которым построены эмпирические модели ночной субавроральной ионосферы при низкой геомагнитной активности (по методике, разработанной для средних широт совместно с сотрудниками ИСЗФ СО РАН) для определенных интервалов долгот. Получено соответствие результатов моделирования с экспериментальными данными. Однако это соответствие не полное из-за того, что при моделировании использовалась модель геомагнитного поля в приближении эксцентричного диполя.

Итак, получено, что процессы ионосферно-магнитосферного взаимодействия через магнитосферную конвекцию играют важную роль в формировании субавроральной ионосферы даже при низкой геомагнитной активности. Эта роль особенно существенна на долготах вблизи геомагнитного полюса (270-300E), обеспечивая ряд особенностей конфигурации главного ионосферного провала на этих долготах.

Б) Средствами спектрального анализа осуществлен поиск дискретных частотных спектров в магнитометрических измерениях, сопровождающих полярные сияния. Для проведения

спектрального анализа, прежде всего необходимо получить стационарный временной ряд, или, во всяком случае, временной ряд близкий к стационарному. С помощью кеограмм полярных сияний, полученных камерами полного обзора неба, были отобраны квазистационарные авроральные события, в которых полярное сияние в течение длительного времени удерживалось в узком интервале широт. Для таких квазистационарных событий были получены магнито-разностные данные, которые представляют собой разность меридиональных магнитных полей, измеренных соседними магнитометрами меридиональной цепочки магнитовариационных станций, расположенных в авроральном овале. Дальнейший спектрально-статистический анализ полученных временных рядов магнито-разностных данных сводится к решению задачи Шустера, т.е. задачи поиска скрытой периодичности (дискретных частот) в геофизических измерениях. Предполагая, что дискретный спектр является эквидистантным или близким к эквидистантному, приближенное решение задачи Шустера можно найти методом Тьюки, настроив ширину спектрального окна на частотное расстояние между последовательными пиками эквидистантного спектра. Найденное таким образом решение оказывается единственным (в пределах погрешности самого спектрального метода). Проведено сравнение полученных частот с дискретными частотами, обнаруженными в полярных сияниях доплерометрическим методом с помощью высокочастотных радаров. Обнаружено хорошее согласие: относительные отклонения не превышают дисперсии взвешенной спектральной оценки. Предложено связать происхождение обнаруженных дискретных частот с вращением замагниченной плазмы в сравнительно мелкомасштабных вихрях магнитосферной конвекции.

Для изучения возможного физического механизма генерации обнаруженных дискретных частот проведено численное моделирование возбуждения продольных токов неустойчивостью неоднородного вращения плазмы в плазменном вихре. Обнаружено, что формирование дискретного спектра частот возможно в том случае, когда происходит фокусировка продольных токов с образованием связанных состояний. В свою очередь, фокусировка продольных токов возможна тогда, когда ротор скорости плазмы (т.е. завихренность течения) достигает своего минимума внутри плазменного вихря. В этом случае генерируемое вторичное электрическое поле вращается (вместе со своими источниками) твердотельным образом, что может обеспечить эквидистантный частотный спектр продольных токов, и, тем самым, объяснить результаты спектрального анализа.

Итак, методами спектрального анализа выделены дискретные частотные спектры данных магнитометрических измерений, сопровождающих полярные сияния. На основе численного моделирования получено, что появление таких спектров может быть обусловлено возбуждением продольных токов неустойчивостью неоднородного вращения плазмы в плазменном вихре и фокусировкой этих токов с образованием связанных состояний.

В) Построена предварительная картина глобального отклика ионосферы на прохождение крупномасштабных внутренних гравитационных волн (КМ ВГВ) во время магнитной бури 3-4 апреля 1979 г. Эта картина включает характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) во всех секторах местного времени, связь этих характеристик с источниками ВГВ, включая дневной касп, разделение воздействия ВВ и электрических полей, (а)симметрию отклика ионосферы в северном и южном полушарии. Наиболее сильно ВГВ проявилась в утреннем Азиатском секторе, менее сильно в полуночном Сибирском секторе и в вечернем Европейском секторе. В дневном Американском секторе довольно сильные волновые возмущения были связаны с усилением активности в области дневного каспа. Волновые возмущения во всех секторах местного времени были гораздо сильнее в северном полушарии, чем в южном, таким образом отклик ионосферы носил сугубо асимметричный характер, несмотря на то, что период наблюдений относится к равноденствию. Возмущения электронной концентрации охватывали всю толщу внешней ионосферы в дополуночном и дополуночном секторах местного времени, как показывают

данные внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19. Однако четкую визуализацию эффектов ВГВ во внешней ионосфере пока провести не удалось, поскольку ионосфера длительное время была возмущена, а для выделения возмущений необходимо решить проблему фона.

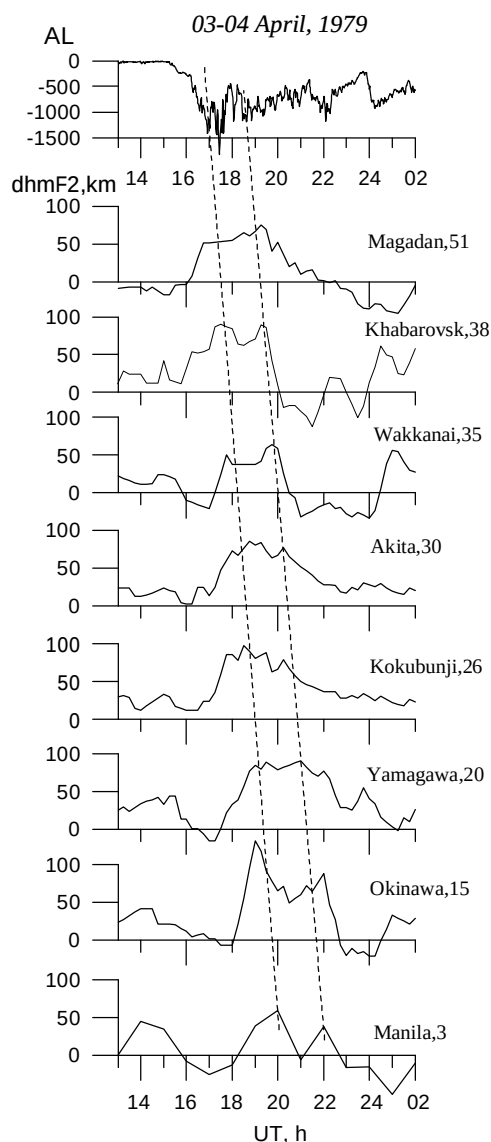


Рис.1. Распространение ПИВ к экватору в северном полушарии по данным наземных станций (вариации $hmF2$) в утреннем Азиатском секторе.

Г) По данным внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19 28 апреля 1979 г. выделены квазиволновые возмущения во внешней дневной ионосфере, связанные с усилением авроральной активности. Источником возмущения явилось резкое усиление восточного электроджета, что, однако, не нашло отражения в вариациях ни АЕ, ни АУ индекса. Согласно оценкам период возмущений в электронной концентрации составлял около 0.5 ч, скорость 350 м/с, длина вдоль меридиана несколько сот километров, что соответствует средним масштабам ПИВ. Амплитуда возмущений составляла всего 30 км в вариациях $hmF2$ и 0.20-0.25 МГц в вариациях $foF2$, но с ростом высоты увеличилась до 0.25-0.30 МГц в вариациях плазменной частоты на высотах спутника 520-580 км. Это противоречит общепринятым представлениям о том, что амплитуда возмущения должна резко уменьшаться с увеличением высоты более 500 км. Предложена методика для выделения пространственных характеристик возмущений. По этой методике выявлен спектр возмущения, состоящего из трех квазипериодических структур. Оптимальные

оценки получены для тренда, описываемого полиномом третьей степени, и разложения остатков по трем гармоникам.

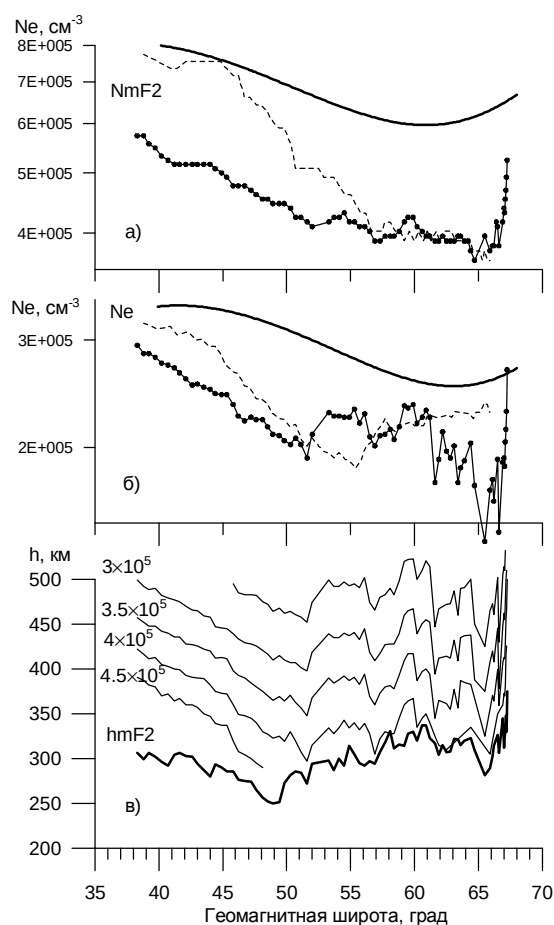


Рис.2. Широтные вариации NmF2 (а) и Ne на высоте спутника (б) на витке 860 (кривая с точками), витке 861 (штриховая кривая) в сравнении с фоновыми вариациями (жирная кривая). Тонкими кривыми на рис.2в показаны изолинии равной концентрации, а жирной кривой – вариации hmF2 для витка 860. Видны 3 квазиволновых возмущения в высоте и концентрации максимума слоя F2 и в электронной концентрации во внешней ионосфере.

Д) Проведено исследование длиннопериодных пульсаций Pc5, которые относятся к категории волн сжатия (compressional pulsations). Наблюдения на 5 спутниках THEMIS, оснащенных идентичной аппаратурой, позволяющей проводить измерения магнитного поля, электрического поля, плазмы и распределения энергичных частиц с высоким временным разрешением, предоставляют уникальную возможность изучать пространственные и временные характеристики геомагнитных пульсаций и механизмы генерации. Создана база данных, содержащая более 500 случаев наблюдения пульсаций. Показано, что они наблюдаются наиболее часто в приэкваториальных областях утреннего и вечернего секторов магнитосферы на $Re > 10$. Проведено детальное исследование Pc5, которые наблюдались 7 ноября 2007 года в утреннем секторе магнитосферы 3 спутниками THEMIS A, D и E. Изучение спектров энергичных ионов показало, что максимум потоков наблюдается на энергиях 2-10 keV, а их интенсивность промодулирована периодами геомагнитных пульсаций. Эти наблюдения позволили использовать “Метод конечного гирорадиуса” (Finite gyroradius method) для определения волновых характеристик пульсаций. Оказалось, что ларморовские радиусы и дрейфовые скорости изменялись в диапазонах 460-930 км и 4.7-13.4 км/с, соответственно. Пульсации имели длины волн в диапазоне $\lambda = 2900-23500$ км и азимутальные числа в диапазоне 18-150, что находится в хорошем согласии с полученными ранее результатами.

Проведено тестирование трех механизмов, предложенных для объяснения генерации пульсаций: зеркальную неустойчивость, дрейф-баунс резонанс и инжекцию плазменных сгустков из плазменного слоя в хвосте магнитосферы. По результатам этого тестирования, длиннопериодные пульсации, наблюдаемые в магнитосфере 7 ноября 2007 года, были интерпретировали как зеркальные дрейфовые волны.

Бадин В.И. Скрытая периодичность в магнитометрических измерениях, сопровождающих полярные сияния // Геомагнетизм и аэрономия (в печати).

Бадин В.И., Керимов А.К. Численное решение эволюционной задачи рекуррентным разложением в ряд Тейлора // Журнал вычислительной математики и математической физики (послано в печать).

Демин М.Г. Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты F2-слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т.49. №3. С.393-399.

4.1.2. Исследование влияния солнечного ветра на ионосферу Земли по данным навигационных спутниковых систем.

Проведено исследование влияния солнечных вспышек на концентрацию электронов в ионосфере Земли. Рассмотрены эффекты очень мощной солнечной вспышки 4 ноября 2003 г. Для анализа воздействия столь мощной вспышки использовались данные по радиопросвечиванию ионосферы Земли сигналами спутниковой навигационной системы GPS на трассе *спутник-Земля*. Определение параметров ионосферы методом радиопросвечивания осуществлялись на основе дальномерных измерений и измерений фазы несущей. Вспышку 4 ноября сопровождал полный набор радиовсплесков, причем рентгеновские детекторы спутника GOES зашкалили. Длительность ионосферного отклика практически соответствует длительности рентгеновского излучения. Синхронные изменения рентгеновского излучения, гамма-излучения Солнца в широком диапазоне энергий во время солнечных вспышек и ионосферных вариаций показывает, что метод радиопросвечивания ионосферы можно использовать в качестве детектора рентгеновского излучения, сопровождающего солнечные вспышки. Кроме того, метод радиопросвечивания ионосферы Земли, основанный на использовании навигационных спутников, может служить хорошим инструментом для обнаружения внезапных геомагнитных возмущений, регистрации эффекта солнечных вспышек, ионосферных бурь в зависимости от зенитного угла Солнца, географического расположения станций наблюдений.

Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Сейсмоионосферные и гелиофизические вариации в период сейсмических событий, «Физика плазмы в солнечной системе», 17-20 февраля 2009, ИКИ РАН, CD-R, С.37.

Смирнова Е.В., Смирнов А.В. Мониторинг ионосферы земли над территорией Японии в период сейсмических событий, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО «Азбука-2000». ISSN 2070-7401, 2009, Выпуск 6. Т.2., С.304-309.

Арманд Н.А., Павельев А.Г., Смирнов В.М. Применение сигналов навигационных спутниковых систем для мониторинга околоземного пространства и изучения условий прохождения радиоволн, 3-я Всероссийская конф. «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение», 6-9 апреля, ИПА РАН, Санкт-Петербург, 2009, С.55-61.

Malkovsky A.P., Smirnova E.V., Smirnov V.M., Tynyankin S.I. Hardware-software complex for determination of the Earth ionosphere parameters according to navigating systems. EGU General Assembly, 13-17 April 2007. Geophysical Research Abstracts 2009, vol. 11, CD-R, EGU2009-3571-1.

4.1.3. Исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра и ультрафиолетового излучения Солнца с помощью высокостабильных сигналов радионавигационных систем на трассах *спутник-спутник* по данным 2002-2008 гг.

В проекте исследовалось географическое и сезонное распределение спорадических слоев в нижней ионосфере Земли в зависимости от солнечной активности в течение периода

2002-2008 годов. Исследования проводились методом анализа амплитудных и фазовых составляющих радиоголограмм, полученных в ходе радиозатменных миссий CHAMP, FORMOSAT-3 путем регистрации высокостабильных сигналов навигационной системы GPS на трассах спутник-спутник. Наблюдалось географическое и сезонное распределение спорадических слоев, впервые полученное с высоким пространственным и временным разрешением.

Результаты глобального мониторинга спорадических образований нижней ионосферы Земли с использованием радиотрасс спутник-спутник.

Разработана методика глобального мониторинга спорадических образований нижней ионосферы. Получены данные о статистике появлений спорадических ионосферных образований в экваториальных, среднеширотных и полярных областях для условий дня и ночи. Получены карты географического распределения интенсивных E_s -структур. Установлена устойчивая связь между приходом к Земле ударной волны солнечного ветра, возрастанием интенсивности мелкомасштабных неоднородностей плазмы и появлением интенсивных спорадических образований в нижней ночной высокоширотной ионосфере. В высоких широтах в ночной ионосфере интенсивные спорадические структуры связаны с воздействием ударных волн солнечного ветра. В полярных районах индекс S4 в течение 2001-2008 гг. постепенно снижался от 10% до 7%, что указывает на постепенное ослабление интенсивности ударных волн по мере приближения к минимуму солнечной активности. Усредненный по всему земному шару индекс S4 практически не менялся. Разработанный метод позволил выяснить связь следующих явлений: приход ударной волны солнечного ветра – высыпание из радиационного пояса энергичных частиц – возбуждение неоднородностей плазмы в F области ионосферы – появление интенсивных спорадических структур в нижней ночной ионосфере.

Pavelyev A.G., Liou Y.A., Wickert J. et al. // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. L21807, 1-5.

Pavelyev, A.G., Y.A. Liou, J. Wickert, A.A. Pavelyev // Proc. of PIERS conf. Moscow 18-21 August. 2009, p. 207-211, Published by The Electromagnetics Academy Cambridge MA 02138.

Яковлев О.И., Викерт Й., Ануфриев В.А. // ДАН. 2009. Т. 427. № 5. С. 624-627.

Яковлев О.И., Матюгов С.С., Ануфриев В.А. // Известия ВУЗ-ов. Радиофизика. 2009. Т. 52. № 3. С. 181-191.

Яковлев О.И., Матюгов С.С., Ануфриев В.А., Черкунова Г.П. // Космические исследования. 2009. Т. 47. № 3. С. 1-9.

4.1.4. Распространении нижнегибридных волн в областях с пониженной концентрацией плазмы в верхней авроральной ионосфере

Исследовано распространение нижнегибридных волн в верхней авроральной ионосфере в областях с пониженной концентрацией плазмы. Показано, что рефракция в такой неоднородной среде может приводить к прямой трансформации нижнегибридных волн, распространяющихся под большим углом к магнитному полю, в свистовые волны, волновой вектор которых направлен под небольшим углом к магнитному полю. Эти квазипродольно распространяющиеся волны могут проникнуть сквозь нижнюю ионосферу к поверхности Земли. Найдены параметры нижнегибридных волн, которые могут быть трансформированы в свистовые волны (совместно с ИПФ РАН).

Пасманик Д. Л., А. Г. Демехов, В. Ю. Трахтенгерц, Е. Е. Титова, М. Райкроф, О распространении нижнегибридных волн в областях с пониженной концентрацией плазмы в верхней авроральной ионосфере. Известия вузов. Радиофизика Том LII, № 4, с. 279-289, 2009

4.1.5. Моделирование взаимодействия гидродинамической волны малой амплитуды с ударной волной

Проведено 1D численное моделирование взаимодействия падающей гидродинамической волны малой амплитуды с ударной волной в вязкой среде. Условия на границах области моделирования соответствовали значениям, даваемым линейной теорией для идеальной

(невязкой) среды. Использовались два набора значений, соответствующие двум типам решений – учитывающим инерционный характер колебаний ударной волны и не учитывающим данный эффект. Проводилось сопоставление амплитуд колебаний центра вязкого скачка уплотнения (точки перегиба профиля скорости) со значениями, даваемыми линейной теорией в идеальной среде. Было показано, что согласие является одинаково хорошим для обоих типов решений. Таким образом, ответ на вопрос, какое из двух типов решений является физически корректным, может дать только сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными результатами.

Lubchich A.A., Response to “Comment on ‘Interaction of small perturbations with shock waves’” [Phys. Fluids 21, 079101 (2009)]. Physics of Fluids, 2009, v.21, Is.7, pp. 079102-079102-2.

4.1.6. Получение истинных параметров самоподобия авроральных структур по данным наземных наблюдений

Путём численного моделирования показано, как учесть и исключить эффект геометрических искажений характеристик самоподобия вариаций аврорального свечения, полученных по данным наземных оптических установок. Получены формулы, связывающие видимые и истинные параметры самоподобия авроральных структур. Даны практические рекомендации экспериментаторам, изучающим проявления турбулентности в полярных сияниях по наземным данным.

При изучении самоподобия вариаций аврорального свечения по данным наземных оптических установок возникает проблема искажений характеристик самоподобия из-за вытянутости авроральных структур вдоль геомагнитного поля, Рис.1. Этот фактор проявляется при сколь угодно малых отклонениях от магнитного зенита, ставя под сомнение пригодность наземных оптических наблюдений для изучения структурирования авроры [Kozelov, 2003; Kozelov and Rypdal, 2007; Golovchanskaya et al., 2008]. Необходимо отметить, что проблема определения истинных параметров скейлинга (самоподобия) в неізотропном случае до сих пор не решена.

Были проведены численные тесты, моделирующие интересный с практической точки зрения случай наблюдения полярных сияний вблизи магнитного зенита. Пространственное распределение интенсивности высыпаний авроральных электронов моделировалось в виде набора реализаций фрактальной броуновской поверхности с заданным показателем самоподобия (параметр Херста). Были рассмотрены два крайних типа энергетического распределения в высыпающемся потоке частиц: 1) Максвелловское распределение со средней энергией 10 кэВ, дающее узкий высотный профиль аврорального свечения, 2) распределение $\sim E^{-2}$, дающее однородные лучи от 100 до 200 км, см. Рис.2. Для заданных параметров высыпаний рассчитывалось объемное распределение аврорального свечения и синтезировалось изображение – аналог наблюдения наземной оптической камерой.

Синтезированные изображения анализировались различными методами, используемыми для получения параметров самоподобия. Показано, что наиболее адекватным является метод логарифмических диаграмм, основанный на дискретном вейвлет-преобразовании с использованием вейвлетов Добеши 3-5 порядков [Abry et al., 2000]. Этот метод: 1) дает наименьший разброс значений при различных реализациях броуновской поверхности, 2) мало чувствителен к типу энергетического распределения высыпающихся частиц, 3) позволяет получить и обосновать простую связь между видимым и истинным параметрами самоподобия авроральных структур.

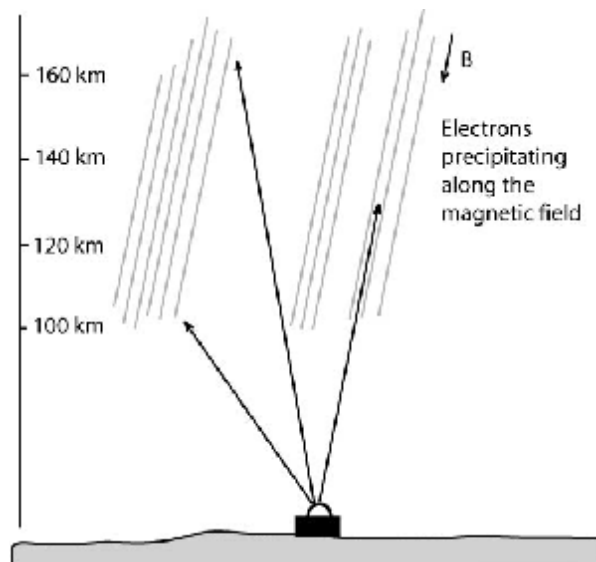


Рис.1. Схема, иллюстрирующая геометрические искажения поперечных к магнитному полю структур при наземных оптических наблюдениях.

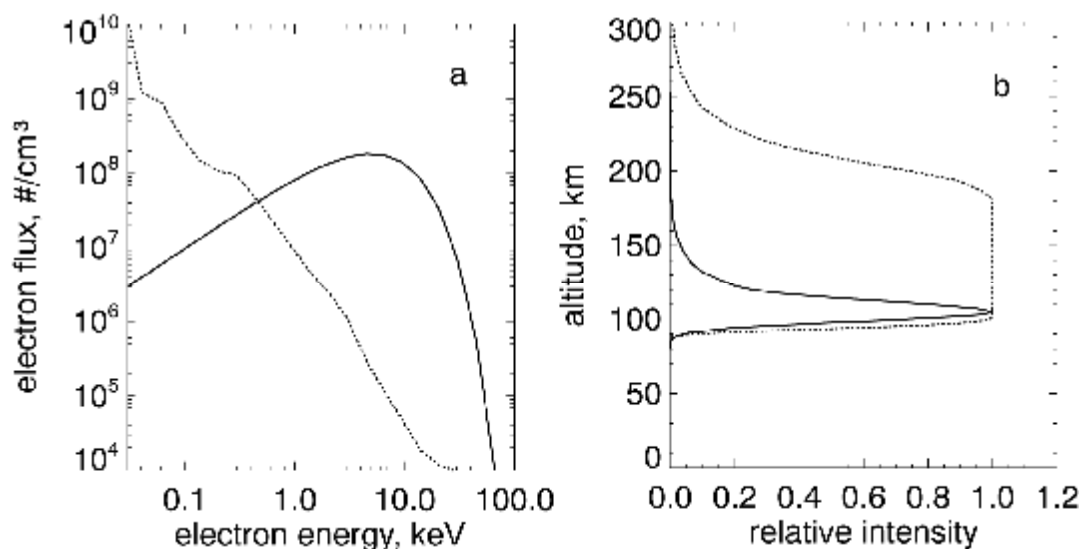


Рис.2. *a* – два типа энергетического распределения электронов, использованные при моделировании: сплошная линия – Максвелловское распределение со средней энергией 10 кэВ, пунктир – распределение, спадающее $\sim E^{-2}$; *б* – высотные распределения аврального свечения (скорости энерговыделения), соответствующие этим энергетическим распределениям.

Kozelov B. V. and I. V. Golovchanskaya (2009) Deriving of aurora scaling parameters from ground-based imaging observations: numerical tests, J.Geophys.Res., V.114, doi:10.1029/2009JA014484

4.1.7. Авроральные проявления инжекции плазмы и диполизации магнитного поля во внутренней магнитосфере.

По данным спутников THEMIS и наземным наблюдениям полярных сияний показано, что фронт диполизации магнитного поля в ночной магнитосфере во время суббури проектируется в ионосферу на экваториальную границу ярких сияний, образующих авроральную выпуклость. После начала взрывной фазы суббури эта граница смещается к экватору со скоростью ~ 30 км/мин; скорость движения уменьшается с уменьшением

широты. С помощью адаптивной модели магнитного поля показано, что скорость распространения фронта диполизации в магнитосфере составляет ~ 100 км/с на расстояниях около $7 R_E$. Фронт диполизации может распространяться из хвоста магнитосферы к Земле до расстояний $5-6 R_E$ (совместно с СПбГУ).

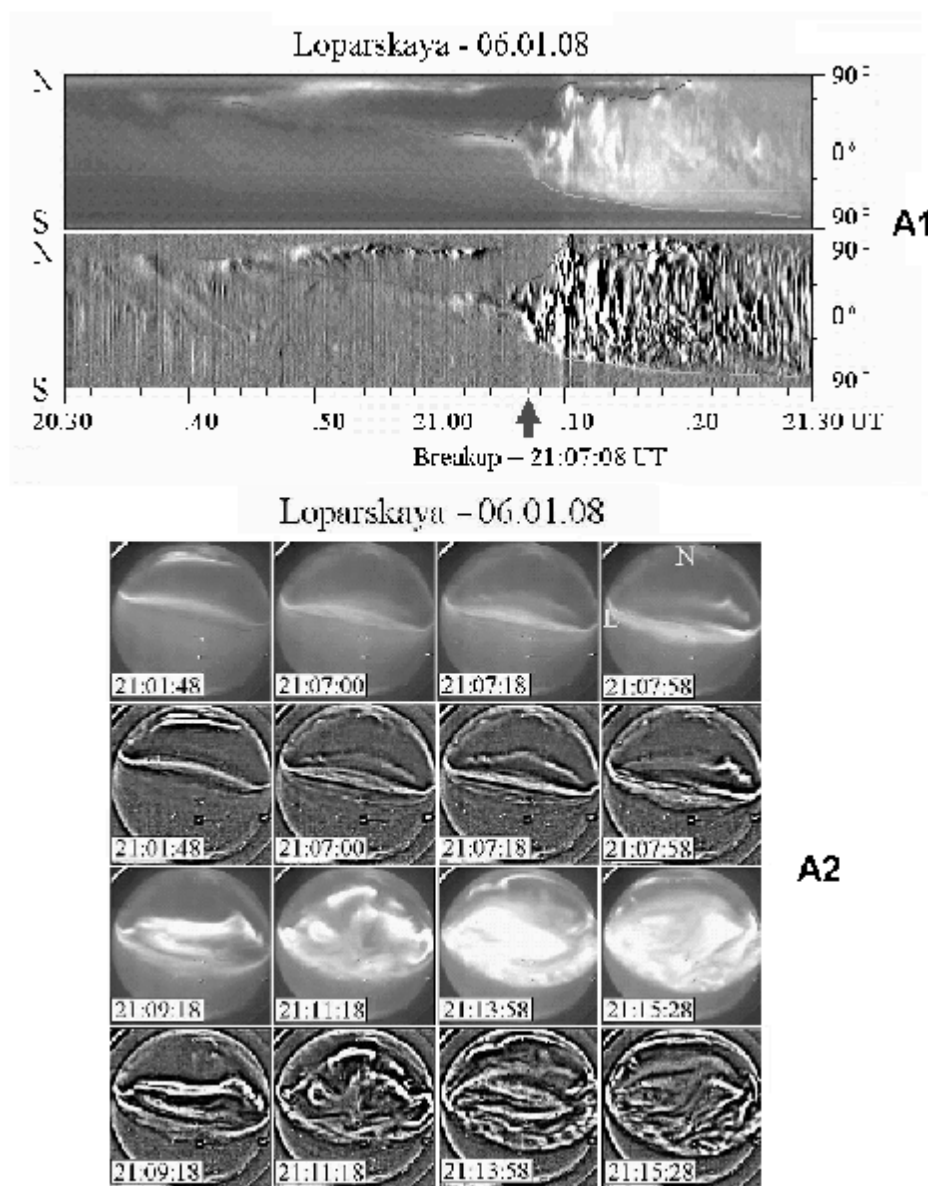


Рис.3 A1 – обычная и фильтрованная кеограммы, представляющие развитие аврорального брейкапа на обс. Ловозеро 06.01.2008. После момента брейкапа (отмечен стрелкой), южная граница сияний движется к югу. A2 – Серия обычных и подвергнутых высокочастотной пространственной фильтрации телевизионных кадров, показывающих 15-минутный интервал развития сияний во время брейкапа. Видна резкая южная граница активных сияний и их сложная пространственная структура.

Хотя исследованию сияний во время брейкапа посвящено очень много работ, динамика движения их южной границы, и ее связь с процессами в магнитосфере практически не исследовалась. В данной работе динамика южной границы изучалась на основе анализа телевизионных данных, зарегистрированных на меридионально разнесенных обсерваториях Ловозеро и Лопарская и данных спутников Themis, Goes и LANL, находящихся в близком по MLT секторе магнитосферы. Использовались также записи финских all-sky камер, спутника POLAR, и низковысотного спутника NOAA-POES. На рис. 3 (A1) кеограммы представляют 1-часовой интервал развития сияний. Верхняя кеограмма является обычной, нижняя подвергнута градиентной фильтрации для лучшего

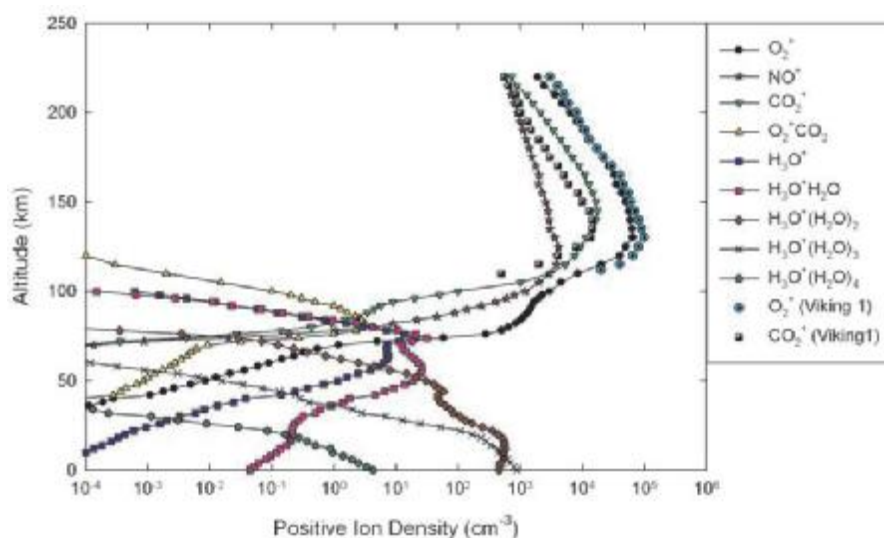
выявления пространственных и временных деталей свечений. Момент брейкапа показан стрелкой. Ниже (A2) приведена серия телевизионных кадров (стандартных и фильтрованных), показывающая 15-минутный интервал активной фазы развития брейкапа. И на кеограммах, и на кадрах видно, что активные структурированные сияния образуют хорошо видимую южную границу, которая расширяется к югу со скоростью 30-50 км/минуту и затухает. Для проектирования южной границы сияний в магнитосферу, что необходимо для сопоставления со спутниковыми измерениями полей и потоков частиц, использовалась адаптивная модель магнитосферы (АМ-1), позволяющая существенно повысить точность проектирования во время активной фазы суббури. Модель основана на стандартной модели Цыганенко (Т-96), но входные параметры модели, вычисленные на основе реальных измерений в солнечном ветре, искусственно варьируются для достижения наилучшего соответствия векторам магнитного поля, измеренных на спутниках. Результаты такого моделирования дополнительно проверены и скорректированы с использованием данных низковысотных спутников (положение границы изотропизации). Анализ всей совокупности полученных данных и проектирование южной границы сияний в магнитосферу показало, что эта граница совпадает с фронтом движущейся к земле области диполизации магнитного поля. Соответственно, динамика границы свечения отражает динамику фронта диполизации.

Sergeev V., Kornilova T. A., Kornilov I. A., Angelopoulos V., Kubysheva M. V., Fillingim M., Nakamura R., McFadden J. P., and Larson D. Auroral signatures of the plasma injection and dipolarization in the inner magnetosphere // J. Geophys. Res., V.114, doi:10.1029/2009JA014522, (2009).

4.2. Исследование ионосфер планет земной группы

4.2.1. Моделирование плотности положительных, отрицательных ионов и электронов в дневной ионосфере Марса.

Впервые проведено моделирование плотности положительных, отрицательных ионов и электронов начиная с поверхности до 220 км в дневной ионосфере Марса. Результаты модельных расчетов электронной концентрации сравниваются с радиозатменными профилями спутников MGS и Марс 4,5 у Марса и с данными COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) у Земли.



Высотные профили концентрации положительных ионов O_2^+ , NO^+ , CO_2^+ , $O_2^+CO_2$, H_3O^+ , $H_3O^+(H_2O)$, $H_3O^+(H_2O)_2$, $H_3O^+(H_2O)_3$, and $H_3O^+(H_2O)_4$ созданных EUV, рентгеновским излучением и галактическими космическими лучами в дневной ионосфере Марса при зенитном угле 77° . Профили ионов CO_2^+ and O_2^+ по данным измерений Viking1 также приведены на рисунке.

Показано, что слои D, E, F у Марса создаются в результате ионизации атмосферы галактическими космическими лучами, рентгеновским (10-90Å) и жестким ультрафиолетовым (90-1026Å) излучением Солнца, расположены на высотах 25-35 км, 110-112 км, 125-145 км, а типичная электронная концентрация в них составляет 70 cm^{-3} ,

$2.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ и $8.4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, соответственно. Водяные кластеры $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$, $\text{NO}_2^-(\text{H}_2\text{O})_n$, и $\text{CO}_3^-(\text{H}_2\text{O})_n$ преобладают в слое D, тогда как в слоях E, F преобладают ионы NO^+ , CO_2^+ и O_2^+ .

Рассчитанные высоты слоев E и F находятся в хорошем согласии с наблюдениями MGS. Концентрация электронов в слое D, по сравнению с этими слоями, уменьшается слабее у Марса (~ 1 порядок величины), чем у Земли (~ 2 порядка величины). Высота слоя F существенно ниже у Марса, чем у Земли. Хотя высоты слоев E у Марса и Земли практически одинаковы, в марсианской ионосфере этот слой существенно тоньше, что соответствует о более узкой пространственной полосе поглощения жесткого излучения в атмосфере этой планеты.

Haider, S. A., M. A. Abdu, I. S. Batista, J. H. Sobral, X. Luan, E. Kallio, W. C. Maguire, M. I. Verigin, and V. Singh (2009), D, E, and F layers in the daytime at high-latitude terminator ionosphere of Mars: Comparison with Earth's ionosphere using COSMIC data, J. Geophys. Res., 114, A03311, doi:10.1029/2008JA013709.

4.2.2. Исследование ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания

Исследована структура ионосферы Венеры по данным двухчастотного радиопросвечивания.

Проведено теоретическое обоснование и разработаны программы для реализации новых технологий обработки данных радиопросвечивания, обеспечивших определение параметров зондирующих радиосигналов с высокой точностью и разрешающей способностью. Применение новой методики анализа радиозатменных данных позволяет изучать случайные неоднородности электронной концентрации, тонкую структуру ионосферы и процессы ее взаимодействия с солнечным ветром.

Анализ характеристик когерентных радиоволн с высокой достоверностью разделяет влияние разных факторов, формирующих вариации фазы, частоты и амплитуды зондирующих сигналов, а высокое временное разрешение позволяет получать детальную картину изменения характеристик радиоволн, что обеспечивает высокое пространственное разрешение для высотных профилей физических характеристик ионосферы Венеры.

Выполнены обработка и анализ экспериментальных данных станций ВЕНЕРА-15,16, получены радиофизические параметры ионосферной плазмы на высотах 80...1000 км на дневной и на ночной стороне, а также вблизи границы день-ночь. Показано регулярное существование нижней ионосферы на освещенной Солнцем стороне и ее отсутствие на ночной стороне. Впервые проведена спектральная обработка флуктуаций частоты радиосигнала, измеренных в сеансах просвечивания ионосферы Венеры. Полученные спектры показывают наличие в верхней дневной ионосфере Венеры случайных неоднородностей электронной концентрации, среднеквадратичное значение которых составляет $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$. Показатель степени трехмерного пространственного спектра турбулентности плазмы близок к аналогичной характеристике для спектра Колмогорова-Обухова.

Гаврик Ю.А., Григорьевская М.В. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосферы Венеры // Нелинейный мир. 2010. №5.

Гаврик А.Л., Ю.А. Гаврик, Т.Ф. Копнина, Л.Н. Самознаев. Вариации амплитуд и частот когерентных радиосигналов при просвечивании дневной ионосферы Венеры // РЭ. 2010. № 2.

Гаврик А.Л. Проект ВЕНЕРА-Д: исследование динамики слоистых структур ионосферы и атмосферы Венеры методом двухчастотного радиопросвечивания // Сборник тезисов: Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, ИКИ РАН, 16-20 ноября 2009. С. 235.

Гаврик А.Л., Ю.А. Гаврик, Л.Н. Самознаев, Т.Ф. Копнина. О возможности радиовидения слоистых структур в экспериментах радиопросвечивания ионосфер планет // III Всероссийская конференция "Радиолокация и радиосвязь". 26-30 октября 2009. С. 359-366.

Gavrik A. L. Project Venus-D: A Study of the Dynamics of Layered Structures in the Ionosphere and Atmosphere of Venus by a Dual-Frequency Occultation Method. Space Science days in IKI, The international workshop "Venera- D: science, payload, cooperation". 2009. P.25.

Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н., Копнина Т.Ф. Плазменные слои в ионосфере Венеры по данным радиопросвечивания // IV Всероссийская научная школа и конференция "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" Муром-2009. С. 301-305.

Гаврик А.Л., Гаврик Ю.А., Самознаев Л.Н. Оценка турбулентности дневной ионосферы Венеры по результатам двухчастотного радиопросвечивания // IV Всероссийская научная школа и конференция "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" Муром-2009. С. 296-300.

<http://www.mivlgu.ru/conf/murom2009/main.php?page=21>

5. Лабораторное моделирование плазменных процессов

5.1. Лабораторное моделирование нестационарных явлений вспышечного типа и радиовсплесков

5.1.1. Экспериментальные исследования структуры и динамики токовых слоев, а также генерации радиовсплесков

А) Детально исследован процесс формирования токового слоя при возбуждении электрического тока в направлении особой линии X типа в 3D магнитной конфигурации. Впервые на основе магнитных измерений получены непосредственные доказательства эффекта «захвата» в слой продольной (направленной вдоль X линии) компоненты магнитного поля, что приводит к ее заметному усилению по сравнению с исходным значением. Исследовано развитие этого процесса во времени и показано, что усиление продольной компоненты обусловлено ее переносом течениями плазмы еще на стадии формирования слоя благодаря «вмороженности» магнитного поля в вещество. Установлено, что область локализации усиленного продольного поля, которая может изменяться как со временем, так и при изменении начальных условий, во всех случаях совпадает с областью, где протекает основной ток плазмы, вызывающий формирование токового слоя.

Дополнительное продольное магнитное поле в слое поддерживается токами в плазме, которые генерируются в плоскости перпендикулярной к основному току и замыкаются вокруг токового слоя. Суммарная величина поперечных токов соизмерима с величиной полного тока, направленного вдоль X линии.

Б) Изучение магнитной структуры токовых слоев, сформированных в различных условиях, позволяет предложить объяснения целого ряда динамических эффектов, которые могут происходить в токовых слоях. Один из таких эффектов – это ускорение плазмы вдоль поверхности слоя и генерация потоков плазмы с энергиями, значительно превышающими температуру ионов.

Как известно, развитие токового слоя в магнитной конфигурации с X линией существенно изменяет структуру магнитного поля, причем основное изменение состоит в значительном усилении тангенциальной к поверхности слоя компоненты поля, что соответствует концентрации в слое электрического тока. Одновременно с усилением тангенциальной компоненты происходит заметное ослабление нормальной к поверхности слоя компоненты, которая в типичных условиях составляет порядка 30% относительно своего начального значения. Нормальная компонента в слое направлена так же, как и в исходном вакуумном поле, т.е. магнитная структура токового слоя по-прежнему содержит X линию, и по мере удаления от нее нормальная компонента растет практически линейно. Несмотря на то, что нормальная компонента примерно на порядок величины меньше, чем тангенциальная компонента, она играет важную роль в динамических процессах, таких

как возбуждение токов Холла вдоль поверхности токового слоя и генерация направленных потоков плазмы.

Экспериментальные данные о пространственных распределениях магнитных полей позволяют рассчитать структуру электрических токов в различных условиях в последовательные моменты времени, а также определить величины электродинамических сил, которые могут вызывать ускорение плазмы. Проведенные расчеты показали, что в течение квазистационарной стадии эволюции токовых слоев, сформированных как в 3D, так и в 2D магнитных конфигурациях, может происходить постепенное увеличение кинетической энергии направленного движения ионов вдоль поверхности слоя. В результате у боковых концов слоя энергия ионов может достигать ≈ 100 эВ, что согласуется с непосредственно измеренными энергиями направленного движения однозарядных ионов аргона (≈ 85 эВ).

В) Методами спектроскопии была исследована эволюция тепловых и направленных движений плазмы в токовых слоях, которые развивались в различных магнитных конфигурациях, при разряде в аргоне и в гелии. Впервые получены данные о скоростях плазмы в токовых слоях, сформированных в трехмерных магнитных конфигурациях с особой линией X типа. Проведено сопоставление с результатами, полученными в двумерных конфигурациях.

Установлено, что при разряде в аргоне температура ионов эволюционно увеличивается от 25 эВ до 45 эВ, тогда как средняя энергия направленного движения плазмы возрастает от 30 эВ до 85 эВ. Показано, что продольное магнитное поле, направленное вдоль X линии, не оказывает влияния на величину ионной температуры и энергию движения ионов вдоль поверхности слоя.

В токовых слоях, развивающихся в гелии, определены плотность плазмы, температура ионов и средняя энергия направленного движения ионов. Обнаружено, что в 2D магнитных конфигурациях энергия направленных плазменных потоков достигает ≈ 400 эВ, при этом у боковых краев слоя плотность плазмы существенно возрастает. Показано, что в 3D магнитных конфигурациях с X линией продольное магнитное поле препятствует ускорению ионов вдоль поверхности токового слоя.

Г) Получены первые экспериментальные результаты, свидетельствующие о возможности реализации импульсной фазы магнитного пересоединения в токовых слоях, формирующихся в 3D магнитных конфигурациях с X линией. Импульсная фаза пересоединения проявляется в спонтанном резком изменении структуры магнитного поля токового слоя и перераспределении электрического тока. Показано, что выбор начальных условий формирования слоя имеет принципиальное значение для осуществления импульсной фазы магнитного пересоединения после продолжительной метастабильной стадии эволюции токового слоя. В контексте моделирования вспышечных явлений в плазме метастабильная стадия ассоциируется с предвспышечным состоянием, тогда как импульсная фаза магнитного пересоединения – со вспышкой.

Д) Проведены исследования генерации электромагнитного излучения на плазменной частоте и ее гармонике при взаимодействии размытого по продольным скоростям ($\Delta v_b/v_b = 0,2$.) электронного пучка с плазмой. Установлено, что в отличие от моноэнергетического пучка генерация радиовсплесков происходит по всей длине области взаимодействия пучка и плазмы.

Генерация радиовсплесков не зависит от вида функции распределения электронов пучка по энергиям (квазилинейное плато или пучок), а определяется лишь энергией возбуждаемых ленгмюровских волн. Механизм электромагнитного излучения связывается с рассеянием ленгмюровских волн на нетепловых флуктуациях ионов, возникающих при развитии распадной неустойчивости возбуждаемых пучком плазменных

волн.

«Стимулированный» коллапс ленгмюровских волн приводит к насыщению пучковой неустойчивости и замедлению роста энергии плазменных волн. Показано, что развитие коллапса и сильной ленгмюровской турбулентности не приводит к увеличению эффективности трансформации энергии ленгмюровских волн в энергию электромагнитного излучения.

В заключение следует подчеркнуть, что исследования эволюции и структуры токовых слоев, развивающихся в замагниченной плазме, а также генерации радиовсплесков имеют фундаментальное значение и позволяют понять природу многих динамических процессов в плазме. Целенаправленные эксперименты, которые осуществляются в хорошо воспроизводимых и контролируемых условиях, позволяют проводить моделирование явлений, происходящих в космосе, таких как вспышки на Солнце, суббури в магнитосфере Земли, генерация радиоизлучений и др.

С.Г. Бугров, Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк. Динамические эффекты в токовых слоях, развивающихся в 2D и 3D магнитных конфигурациях // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2009г., С.188.

Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк, В.П. Гавриленко. Диагностика электрических полей в плазме токовых слоев на основе эффектов аномальной и нормальной асимметрии спектральной линии атомарного гелия He I 667.8нм // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2009г., С.199.

С.Г. Бугров, В.С. Марков, А.Г. Франк. Эволюция токовых слоев в магнитных полях с особой линией X типа // Тезисы докладов XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 9-13 февраля 2009г., С.248.

A.G. Frank, S.G. Bugrov, V.S. Markov. Enhancement of the guide field during the current sheet formation in the three-dimensional magnetic configuration with an X line // Physics Letters A 2009. V. 373(16), P. 1460-1464.

А.Г. Франк. Особенности эволюции и структуры токовых слоев в зависимости от условий формирования слоя // Тезисы доклада конференции по Программе фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-15 «Плазменные процессы в солнечной системе», Москва, ИКИ, 16-20 февраля 2009 г.

Н.П. Кирий, А.Г. Франк. Экспериментальное исследование тангенциального ускорения плазмы в токовых слоях // Тезисы доклада конференции по Программе фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-15 «Плазменные процессы в солнечной системе», Москва, ИКИ, 16-20 февраля 2009 г.

Д.М.Карфидов. Лабораторное моделирование радиовсплесков, генерируемых при распространении размытого электронного пучка в плазме // Тезисы доклада конференции по Программе фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН ОФН-15 «Плазменные процессы в солнечной системе», Москва, ИКИ, 16-20 февраля 2009 г.

A.G. Frank. Impulsive phase of magnetic reconnection in current sheets formed in 3D and 2D magnetic configurations // Abstract of the 10-th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS) 8-12 June 2009, Djurönäset, Sweden.

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. 35(3), в печати.

Н.П. Кирий, В.П. Гавриленко, А.Г. Франк. Спектроскопические исследования направленных движений плазмы в токовых слоях // Труды XIX Конференции по Фундаментальной Атомной Спектроскопии (ФАС XIX) 22-29 июня 2009 г., Архангельск - Соловки. Вестник Поморского Университета им. Ломоносова, 2010, в печати.

A.G. Frank. Unsteady magnetic reconnection in laboratory experiments with current sheets // Abstract of the 51-th Annual Meeting of the American Physical Society – Division of Plasma Physics (APS-DPP09) November 2-6, 2009, Atlanta, Georgia, U.S.A. Bulletin of the American Physical Society 2009, V.54, №15, P.176.

5.1.2. Лабораторное моделирование продольных токов планетных магнитосфер

Были получены результаты по обтеканию магнитного диполя, в которых впервые в лабораторных условиях наблюдалась генерация интенсивных продольных токов. Подробные измерения полного и локального тока, структуры магнитных возмущений на полюсах и экваториальной магнитопаузы, характера движения электронов обнаружили их подобие продольным токам зоны-1 в магнитосфере Земли. Существование токов прямо связано с возможностью их замыкания на проводящей оболочке диполя. Сравнение данных с проводящей и диэлектрической оболочкой позволили выявить характерные детали магнитных возмущений, создаваемых продольными токами и обнаружить их связь с электрическим потенциалом, наводимым в экваториальной части магнитопаузы. Результаты работы могут иметь значение для исследования Меркурия, в котором магнитные возмущения от продольных токов из-за малого размера магнитосферы могут быть особенно большими.

Совокупность полученных данных позволяет утверждать, что в лабораторных экспериментах по импульсному обтеканию диполя не только образуется дневная часть магнитосферы и каспы, но и наблюдаются интенсивные продольные токи. Их направление соответствует токам зоны-1. Существование продольных токов прямо связано с проводимостью ионосферы. В лабораторных условиях замыкание токов обеспечивалось хорошо проводящей поверхностью диполя и эмиссией электронов из металла в плазму на утренней стороне. Данные указывают, что полярные области протекания продольных токов связаны с магнитослоем в экваториальной части и с внутренней областью магнитосферы сразу за магнитопаузой. Можно оценить величину обратного тока ~ 1 кА, т.е. часть продольного тока может протекать в этой области. Именно на этом участке и в магнитослое $X=20\div 24$ см наблюдалась сильная разница в распределении электрического потенциала, измеренного зондами. Если для непроводящей «ионосферы» эти потенциалы составляли ~ 1 кВ, то для проводящей уменьшались в несколько раз после развития продольного тока.

Характер зависимости интегральной величины продольного тока от момента диполя указывает на МГД природу его происхождения. Относительный вклад таких кинетических эффектов, как дрейфовые движения в неоднородном магнитном поле, пропорциональные гирорадиусу ионов, должен уменьшаться с увеличением магнитного поля. Полная величина токов на обоих полюсах ~ 4 кА сравнима с полным током Чепмена-Ферраро в экваториальной части магнитопаузы $\sim 4\div 8$ кА. Отметим, что максимальная оценка для продольных токов на Земле (Siscoe et al, 2002b) и Меркурии дает тот же результат. Оценивая ток Чепмена-Ферраро как $I_{CF} \sim B_m R_m$, поле на полюсах от продольных токов как $B_{FAC} \sim I_{FAC}/R_o$, приравнявая $I_{CF} \approx 2 \cdot I_{FAC}$ и выражая поле на магнитопаузе через дипольное поле на полюсе $B_m \approx 0.5 \cdot B_o (R_o/R_m)^3$, получим оценку возмущение поля на полюсах, выраженную только через размер магнитопаузы $B_{FAC} \approx 0.25 \cdot B_o (R_o/R_m)^2$. Как видно, для Меркурия эффект продольных токов может быть особенно заметным, порядка 10% от основного дипольного поля. Данная формула дает для лабораторного эксперимента величину 400 Гс при измеренной 200÷400 Гс, для Земли 100 нТ при наблюдаемых 100÷500 нТ и для Меркурия ~ 50 нТ. Таким образом, при вычислении точного значения магнитного момента Меркурия по данным космических аппаратов (Anderson et al, 2008) необходимо учитывать вклад продольных токов.

По сравнению с экспериментами типа терреллы, применение диполя с большим моментом и импульсной лазерной плазмы с большим максимальным давлением позволили увеличить масштаба эксперимента и не только наблюдать интенсивные продольные токи, но и впервые подробно их исследовать. Совокупность полученных данных показывает их аналогию, в таких чертах как направление, относительная величина и характер движения электронов, токам зоны-1 на Земле. Впервые было проведено прямое сравнение случаев

обтекания диполя с проводящей и непроводящей поверхностью. Это позволило выявить структуру магнитных возмущений вносимых продольными токами в магнитосферу, и обнаружить связь продольных токов с наличием электрического потенциала в экваториальной части пограничного плазменного слоя, в том числе - обратное влияние продольных токов на электрический потенциал. В дальнейшем планируется исследование этого процесса как механизма насыщения продольных токов, а также влияния внешнего магнитного поля, соответствующего северному и южному направлению ММП.

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

5.2. Моделирование динамики волн в магнитосфере и ионосфере

5.2.1. Лабораторное моделирование динамики магнитосферных мазеров.

В рамках программы экспериментально исследованы вспыхивающие процессы генерации электромагнитных волн в плазменном циклотронном лазере, 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 ($N_e \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 300 \text{ эВ}$) с изотропной функцией распределения по скоростям, и горячая, существенно менее плотная ($N_e \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 10 \text{ кэВ}$) с сильно неравновесным распределением.

Согласно заявленному плану работ в текущем году исследовались временные и спектральные характеристики вспыхивающей активности плазмы на стадии распада импульсного ЭЦР разряда в прямой аксиально-симметричной магнитной ловушке. В распадающейся плазме примерно через 500 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. Характерная длительность импульсов изменяется от 1 до 10 мкс, период импульсов - от 100 до 200 мкс. Интенсивность электронных высыпаний на стадии распада плазмы была сопоставима с интенсивностью во время СВЧ импульса гиротрона. Характерная энергия высыпавшихся электронов составляла 10 кэВ.

В текущем году основное внимание было уделено исследованиям спектрального состава генерируемого электромагнитного излучения. Эксперименты показали, что всплески электромагнитного излучения генерируются на частотах выше 20 ГГц, что заметно превышает значение гирочастоты электронов в центре ловушки (порядка 10 ГГц). Как следует из разработанной ранее участниками проекта самосогласованной модели циклотронного лазера, частота излучения определяется гирочастотой электронов, взаимодействующих с электромагнитной волной. Ранее предполагалось, что функция распределения энергичных электронов имеет максимум вблизи питч-углов $\theta \sim 90^\circ$, что соответствует максимальной концентрации электронов в центре ловушки, и, как следствие, генерации электромагнитного излучения вблизи электронной гирочастоты в центральном сечении ловушки. Однако данные эксперимента свидетельствуют о том, что в плазме формируется распределение энергичных электронов с максимумом вблизи питч-угла θ_p , соответствующего резонансному нагреву на частоте гиротрона 37,5 ГГц. Иными словами, взаимодействие волны с горячими электронами наиболее эффективно происходит вблизи зоны ЭЦР нагрева, следовательно, частота генерируемого излучения может существенно превышать гирочастоту электронов в центре ловушки. Таким образом, результаты эксперимента укладываются в рамки существующей теории циклотронного лазера в разреженной плазме.

В дальнейшем планируется провести эксперимент по более точному измерению спектра СВЧ излучения при циклотронной неустойчивости распадающейся плазмы. Также, планируется произвести расчет инкрементов циклотронной неустойчивости медленной и быстрой необыкновенных волн для функции распределения электронов, характерной для ЭЦР нагрева, и качественно сравнить с экспериментом спектральный состав излучения и характерные величины инкрементов. Результаты исследований будут сопоставлены с опубликованными ранее теоретическими представлениями, и прежде всего, дадут ответ на вопрос, на какой плазменной моде генерируется излучение (Z-мода или X-мода). Этот вопрос весьма интересен, поскольку циклотронный механизм генерации электромагнитного излучения X-моды с направлением распространения поперек магнитного поля ловушки, считается основным в происхождении аврорального километрового излучения Земли и, возможно, играет ключевую роль в происхождении декаметрового излучения Юпитера. При успешном завершении данных исследований, их логичным продолжением будут работы по лабораторному моделированию вспышечных явлений в разреженной плазме магнитосфер Земли и Юпитера.

Обнаружена и исследована генерация электромагнитных колебаний в окрестности нижнегибридного резонанса и на частоте баунс колебаний быстрых электронов в плазменном резонаторе магнитосферного типа, сформированном ВЧ разрядом в пробочной магнитной ловушке. Обсуждаются результаты натурных ракетных экспериментов по стимулированию мазерных эффектов, в том числе на частотах, отвечающих баунс колебаниям 40 кэВ электронов в магнитосферной силовой трубке геомагнитного поля.

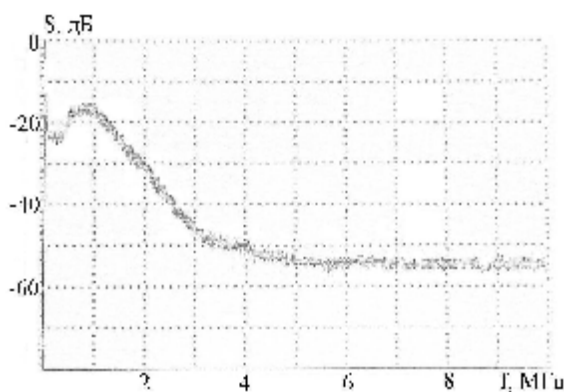


Рис. 5: Спектральная плотность мощности колебаний электрического поля в плазменном столбе

Измеренные спектральные плотности мощности колебаний электрического тока и электрического поля показали генерацию «линий» шумового электромагнитного поля на частоте ~ 850 кГц, что соответствует баунс частоте продольных осцилляций разрядных электронов с энергией $\sim 15-20$ эВ. На рис. 6 приведена спектральная плотность мощности наведенных на дипольную антенну колебаний электрического поля в плазменном резонаторе на частотах, близких к частоте продольных колебаний разрядных электронов между пробками магнитной ловушки.

Резкое повышение уровня спектральной плотности мощности регистрируется также в области частот нижнегибридного резонанса в случаях, когда в разрядную камеру подавался сигнал с дополнительного ВЧ генератора на частоте порядка 3.5 МГц. На рис. 7 приведен шумовой спектр в области частот 0.1-10 МГц, усредненный по достаточно большому времени регистрации и сглаженный с целью устранения побочных сигналов при давлении в колбе $P \leq 10^{-4}$ Тор. Из представленной зависимости видно, на фоне основной и первой гармоники сигнала дополнительного ВЧ генератора, уширение максимума в спектре, отвечающего, как отмечалось выше, генерации шума баунс электронами, а также широкую спектральную линию в районе 4 МГц. Отметим, что при данных параметрах разрядной плазмы данная частота отвечает нижнегибридной резонансной частоте столба однородной плазмы с концентрацией, соответствующей концентрации в центральной части разрядного канала.

Экспериментальные результаты позволяют говорить о необходимости учета механизмов возбуждения баунс электронами КНЧ излучений в магнитосфере Земли при анализе шумовой электромагнитной обстановки в околоземном пространстве. Весьма интересным результатом является показанная в лабораторном и натурном экспериментах возможность стимуляции таких возмущений радиоразрядом в ионосфере Земли. Управляемые возмущения такого сорта могут быть особенно интересными для активной диагностики радиационных поясов Земли и процессов, происходящих в высокоширотной части магнитосферы.

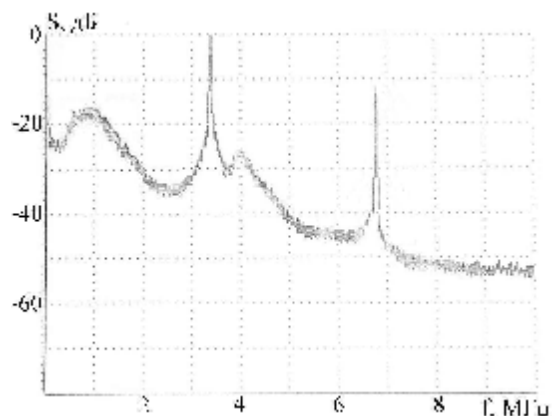


Рис. 6: Спектральная плотность мощности колебаний электрического поля в плазменном столбе при наличии дополнительного сигнала на частоте 3.5 МГц

Белов А.С., Марков Г.А., Попова Л.Л., Чугунов Ю.В. Лабораторное моделирование и искусственное стимулирование магнитосферных мазерных эффектов // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т.49, № 2. С.199-208.

5.2.2. ЭЦР нагрев плазмы, окружающей дипольные антенны, и возбуждение волн свистового диапазона частот

Резонансный нагрев плазмы, окружающей бортовые антенны космических аппаратов (КА), при совпадении частоты передатчика с локальным значением электронной гирочастоты и ее гармониками наблюдается при работе ионозондов, размещаемых на геофизических спутниках. При достаточно высоком уровне мощности (порядка 100 Вт), характерном для систем внешнего радиоимпульсного зондирования ионосферы, нагрев плазмы в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) приводит к значительному увеличению локального энергосодержания плазмы и формированию электронных потоков с энергией до нескольких сотен эВ. С одной стороны, при проведении космических экспериментов ЭЦР нагрев плазмы может рассматриваться как нежелательное, паразитное явление, сопровождаемое генерацией шумов и затрудняющее работу всего комплекса бортовой аппаратуры КА. С другой стороны, ЭЦР нагрев может быть использован для возбуждения низкочастотных волн, в частности – свистового диапазона, прямое возбуждение которых с борта КА, как правило, малоэффективно. Ниже кратко описан способ параметрического возбуждения свистовых волн при модулированном ЭЦР нагреве плазмы, например – с борта КА.

Тепловые электроны, пролетающие через ближнюю зону антенны, в условиях ЭЦР ускоряются преимущественно в направлении, перпендикулярном внешнему магнитному полю, и соответствующий диамагнитный эффект приводит к наведению дополнительного магнитного момента в силовой трубке, опирающейся на антенну. Таким образом, возможно формирование крупномасштабных плазменных областей, сильно вытянутых вдоль направления геомагнитного поля, которые содержат ускоренные по поперечной энергии электроны. Если ЭЦР нагрев производится высокочастотным полем, модулированным по амплитуде, поперечная энергия электронов и магнитный момент возмущенной области плазмы модулируются с соответствующим периодом. В результате, протяженная область плазмы, содержащая ускоренные частицы, может выступать в роли «бестелесной» антенны, излучающей волны на частоте модуляции греющего поля.

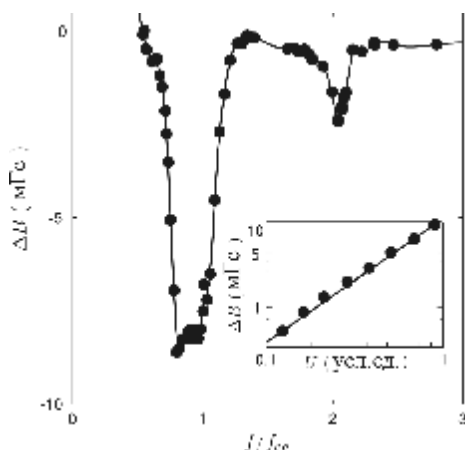


Рис. 8: Зависимость величины диамагнитного сигнала от отношения частоты накачки f к электронной циклотронной частоте f_{ce} . Врезка: зависимость величины диамагнитного сигнала от амплитуды импульса накачки.

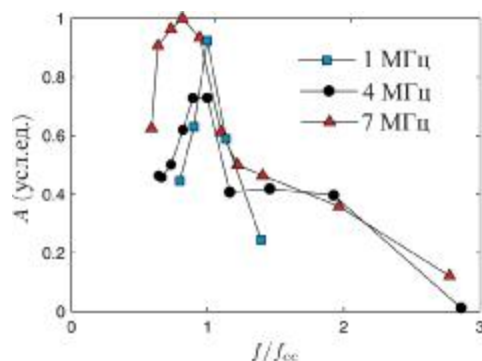


Рис. 7: Зависимость амплитуды низкочастотных свистовых волн, возбуждаемых при различных частотах модуляции накачки, от отношения несущей частоты накачки f к электронной циклотронной частоте f_{ce}

Результаты модельных лабораторных экспериментов, выполненных на плазменном стенде «Крот», представлены на рис. 8, 9. Параметры эксперимента выбраны соответствующими, по критериям масштабного моделирования, физическим условиям в верхней ионосфере. Концентрация плазмы $n_e \sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 1 \text{ эВ}$, величина внешнего магнитного поля изменялась в пределах $B_0 = 10 - 50 \text{ Гс}$. Частота накачки была фиксированной, и составляла $f = 68,5 \text{ МГц}$; выходная мощность используемого ВЧ генератора достигала $P = 250 \text{ Вт}$. В качестве моделей бортовых антенн КА использовалась рамочная антенна диаметром 7 см и электрическая дипольная антенна длиной 6 см. Как показывают результаты экспериментов, в области плазмы, вытянутой на длину свободного пробега электронов вдоль силовых трубок, опирающихся на модель антенны, наблюдается диамагнитный эффект с увеличением энергосодержания плазмы более чем в 2 раза. Наблюдаемый диамагнитный эффект носит резонансный характер: величина возбуждаемого квазистационарного магнитного поля максимальна при совпадении частоты импульса накачки, поданного на антенну, с электронной циклотронной частотой и ее гармониками (рис. 8). При модулированном нагреве плазмы наблюдается возбуждение свистовых волн на частоте модуляции; эффективность генерации свистовых волн максимальна в условиях ЭЦР (рис. 9). Возбуждаемые волны – электромагнитного типа, что подтверждается измерениями их фазовых и групповых скоростей. Как показывают эксперименты, при модулированном ЭЦР нагреве плазмы возбуждается крупномасштабная волновая структура, размеры которой значительно превосходят размеры области, занятой ускоренными электронами, и масштабы волнового поля, возбуждаемого при прямой подаче низкочастотного сигнала на модель антенны.

Таким образом, результаты предварительных экспериментов подтверждают возможность возбуждения низкочастотных свистовых волн при модулированном ЭЦР нагреве околоземной плазмы с существенно большей эффективностью, чем при их прямом возбуждении с помощью компактных бортовых антенн КА.

Gushchin M., Korobkov S., Kostrov A., Strikovskiy A., Starodubtsev M. Basic plasma physics experiments and modeling of space phenomena on large inductively coupled magnetoplasma devices. // Abstracts of 10th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS), Sweden, Djurö, June 8-12, 2009.

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. Проведено математическое моделирование ускоренных неустойчивых движений плоских, цилиндрических и сферических слоев газа, выполнен анализ влияния начальных условий на формирование регулярных структур

В настоящее время теоретически и экспериментально установлено, что при развитии неустойчивости Рэлея-Тейлора возможно образование достаточно регулярных пространственных структур, изменяющихся со временем. В случае тонких оболочек возникают пальцеобразные деформации их поверхности с накоплением массы и импульса в отстающих от основного движения частях оболочки. Вместе с тем влияние начальных условий и геометрии течения на рост и структуру конденсаций в литературе ранее не рассматривалось.

Путем численного моделирования в рамках полной системы гидродинамических уравнений установлено, что для плотных оболочек эффект кумуляции массы имеет место независимо от их формы. Примеры образующихся пальцеобразных конденсаций представлены на рис. 1. При этом $\rho_1/\rho_0=50$, $\rho_2=\rho_0$, $p_1=p_0$, $T_1=T_2$, отношение толщины оболочки δ к длине волны равно 0,05; начальное положение границы слоя x_{c0} на рис. 1 и ниже равно 0 (а), 8 (б) и 1,5 (в).

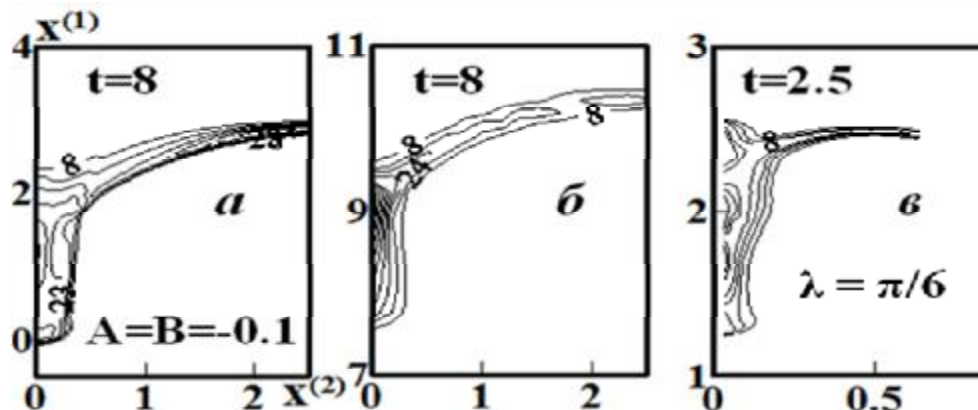


Рис. 1. Изохоры для (а) плоского, (б) цилиндрического, (в) сферического слоя. Нормированные начальные амплитуды $x^{(1)}$ – и $x^{(2)}$ – компонент скорости обозначены соответственно через А и В.

Зависимость скорости роста и формы возмущений от начальных условий исследована в трех предельных случаях: $A \neq 0$, $B=C=0$ - доминируют нормальные к поверхности слоя возмущения скорости $v_{x(1)}$; $B \neq 0$, $A=C=0$ - возмущена только составляющая скорости $v_{x(2)}$; $C \neq 0$, $A=B=0$ - координата x_{c0} зависит от $x^{(2)}$.

Основные особенности развития неустойчивости слоев с теми же, что и на рис. 1, параметрами отражены на рис. 2 и 3 (m_e - относительное изменение интегральной по $x^{(1)}$ массы оболочки).

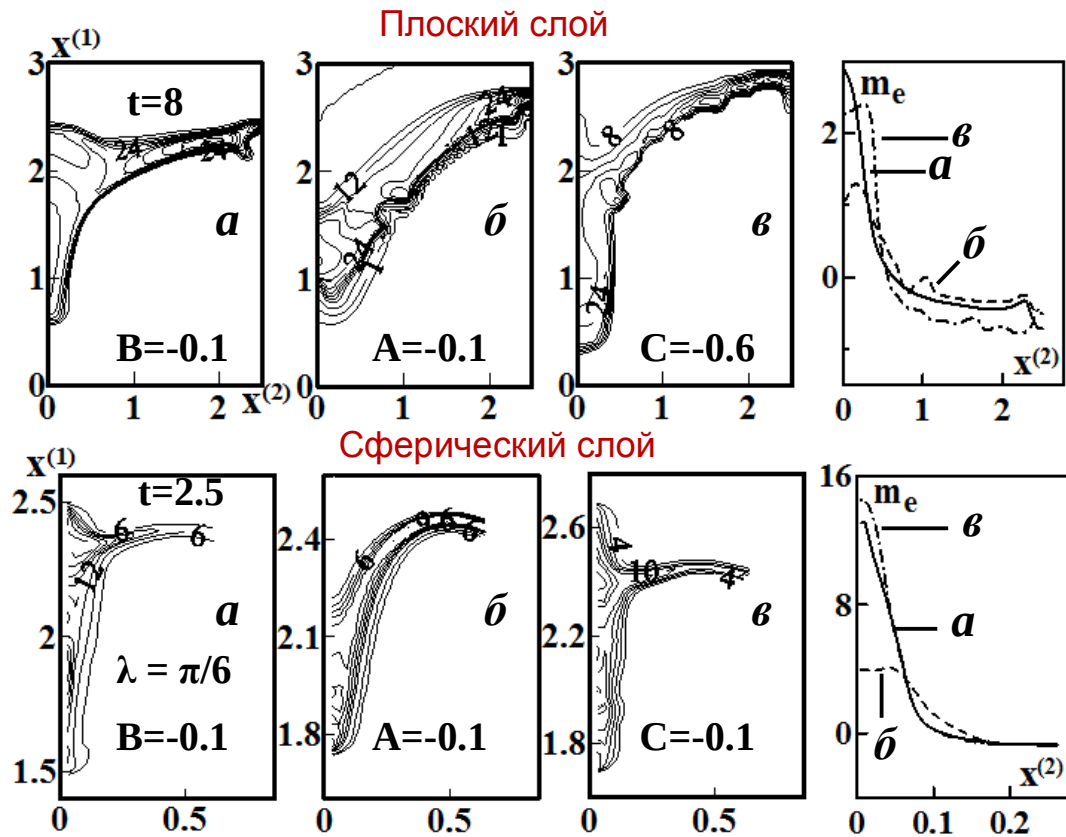


Рис. 2. Изохоры (а),(б),(в) соответствуют ненулевым начальным амплитудам возмущений компонент скорости $v_{x(2)}$, $v_{x(1)}$ и формы поверхности.

Показано, что существование регулярной структуры возмущений обеспечивается доминированием в начальных условиях искривлений поверхности слоя и касательной к ней компоненты скорости. Данный вывод справедлив для излучающих сред с существенно различающимися физическими свойствами.

Котова Г.Ю., Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р. «Моделирование регулярных структур, формирующихся в ускоренно движущихся излучающих газовых оболочках» // Международная конференция МСС-09. 23-25 ноября 2009 г. Сборник трудов. С. 218-223.

6.1.2. Применение нелинейной методов для исследования физических явлений в гелиосфере.

А) Для описания бесстолкновительной плазмы солнечной короны и солнечного ветра рассмотрены 16-ти моментные уравнения переноса (интегральные соотношения кинетического уравнения Больцмана-Власова), приводящие к анизотропной МГД с тепловыми потоками. В рамках этого приближения проанализированы волны и неустойчивости плазмы с анизотропным давлением вдоль и поперек магнитного поля, изучены эффекты, связанные с тепловыми потоками. Наряду с классическими несжимаемыми шланговыми модами, которые не изменяются по сравнению с приближением ЧГЛ, найдены и изучены новые дополнительные сжимаемые моды (тепловые волны), а также аналоги быстрых и медленных МГД волн. Установлено, что в присутствии тепловых потоков фазовые скорости всех найденных мод являются асимметричными по отношению к направлению внешнего магнитного поля, т.е. волны распространяются вдоль и против магнитного поля с различными скоростями. При некоторых значениях параметров плазмы происходит взаимодействие мод между собой.

Сильное взаимодействие происходит между обратными (распространяющимися против направления магнитного поля) модами. В области взаимодействия мод, где совпадают фазовые скорости волн, возникает неустойчивость. Возможны оба типа неустойчивостей - апериодическая и колебательная. При резонансном взаимодействии трех обратных мод (быстрые тепловые и зеркальные и медленные тепловые) в условиях возникновения классической шланговой неустойчивости возникает новый тип неустойчивости. Эта неустойчивость имеет максимум инкремента при наклонном распространении, и он превосходит максимум инкремента обычной шланговой неустойчивости. В отличие от обычной шланговой неустойчивости найденная неустойчивость обусловлена сжимаемыми возмущениями плазмы. Вычислены возмущения плотности в найденных модах. Полученные результаты представляют интерес для описания волновых явлений в солнечной короне и солнечном ветре.

Б) Магнитные поля на Солнце разбиты на магнитные трубки, распространение волн в которых является актуальным в настоящее время благодаря многочисленным наблюдениям динамики тонкой структуры атмосферы Солнца. Наибольшие трудности представляет собой исследование нелинейных и ударных волн. Был выведен ряд модельных уравнений для нелинейных волн в трубках на основе модельных законов дисперсии, которые качественно соответствуют реальным законам дисперсии для медленных волн в магнитных трубках. Главным при этом был отказ от приближения тонкой трубки. Оказалось, что в трубках существуют два типа волн уединенных волн.

Данный факт был установлен в частности с помощью обобщенного уравнения КдВ. Выведенное нами обобщенное уравнение Бюргерса-КдВ позволило найти два решения, которые описывают слабые ударные волны и гидравлический скачок (бора).

В) Многочисленные наблюдения колебаний в солнечных пятнах и бегущих волн в полутени показывают, что эти явления каким-то образом связаны. Однако четкого представления о природе такой связи никем представлено не было. Разработана теория, которая позволяет объяснить оба явления в рамках одной модели. Оказывается, что в данном случае необходимо учитывать влияние эффекта Эвершеда на распространение волн.

В.Д.Кузнецов, Н.С.Джалилов: 16-ти моментное приближение для бесстолкновительной космической плазмы: волны и неустойчивости // Физика плазмы 2009, т.35, №10, 1-15; / V.D.Kuznetsov, N.S.Dzhalilov Sixteen-moment approximation for a collisionless space plasma: waves and instabilities, Plasma Phys.Reports, 2009, vol.35, No11, pp.961-974

6.1.3. Мультифрактальная диагностика физических процессов в гелиосфере

А) Описание динамических режимов активных областей Солнца в рамках скейлинговых, морфологических и топологических характеристик.

Были проведены исследования геометрия и топология магнитных полей вспышечных АО и фона по магнитограммам полного диска Солнца (SOHO). Используя подходы геометрии случайных полей, рассматривалось множество выбросов магнитного поля выше заданного уровня. Для каждого из них оценивалось число выбросов поля на единицу площади. Это удобно сделать с помощью характеристики Эйлера – гомотопического инварианта, который измеряется общим числом максимумов и минимумов поля за вычетом седловых точек. Вожно, что существуют аналитические выражения этой характеристики в зависимости от уровня, для некоторых модельных полей: гауссовское, логнормальное, и т.д.

Кроме того, подсчитывался суммарный периметр кластеров, образованных множеством выбросов. Эта характеристика позволяет оценить полную вариацию поля в ограниченной

области, согласно теореме о ко-площади. Обе характеристики являются функционалами Минковского, обладающими морфологическими свойствами. Мы пытались найти ответы на следующие два вопроса.

- Различимы ли топологии поля АО и фона и какие известные случайные поля могут служить их моделями?
- Связаны ли изменения двух функционалов во времени с вспышечной активностью АО?

Мы получили, что зависимость Эйлеровой характеристики от уровня для фона сохраняет свою форму в течении 6-8 суток (Рис.1, слева). Она отличается от Гауссовского поля заметной ассиметрией (Рис.1, справа) и хорошо аппроксимируется моделью логнормального поля (Рис. 2). Последняя была получена с помощью бесконечно делимых каскадов (IDC).

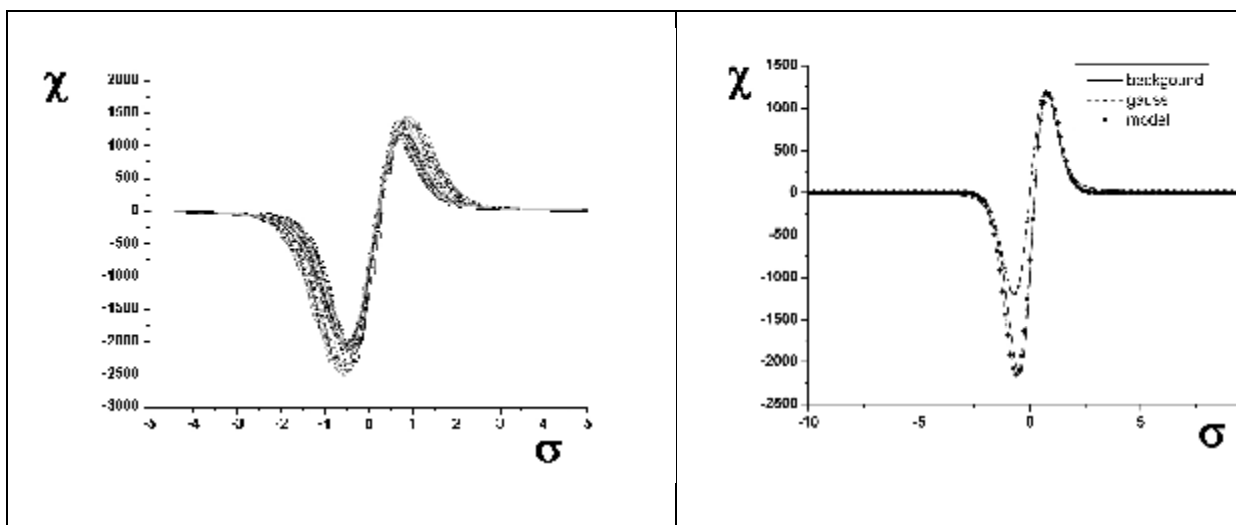


Рисунок 1. (Слева) Характеристика Эйлера в зависимости от уровня по выборке из 85 магнитограмм. (Справа) Усредненная по выборке характеристика Эйлера в сравнении с аналитической Гауссовской моделью. По оси абсцисс $1s \approx 30$ Гс.

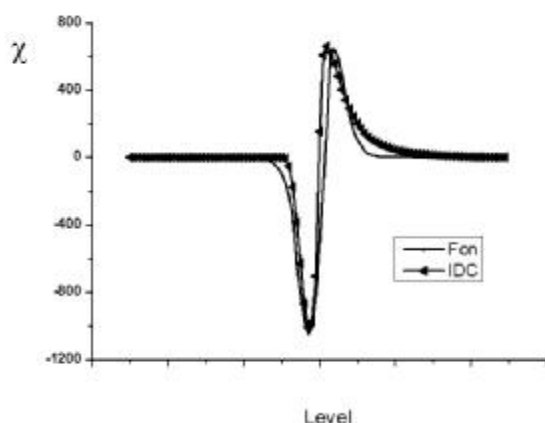


Рисунок 2. Сравнение характеристик Эйлера для поля фона и модельного логнормального поля.

Поведение Эйлеровой характеристики для АО оказалось аналогичной фоновому полю, отличаясь лишь масштабом. Таким образом, показано, что топология полей АО и фона одинаковы и аппроксимируются перемежаемым полем логнормального типа.

Сравнение вариаций функционалов во времени с вспышечной эволюцией АО позволило выделить несколько типичных сценариев. Один из них приведен на Рис.3: Эйлерова характеристика по всем уровням (показаны лишь некоторые из них)

демонстрирует резкую депрессию, после которой следует серия вспышек. Существует сценарий, в котором серия вспышек сопутствует депрессии. Напомним, что уменьшение характеристики Эйлера может быть вызвано либо уменьшением числа экстремумов, либо увеличением числа седловых точек. Такое увеличение возможно связано с всплывающим потоком.

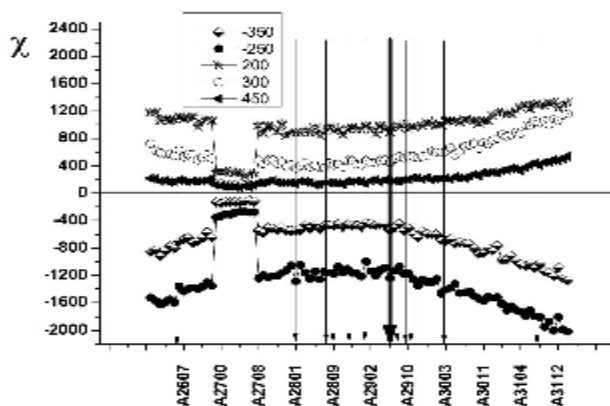


Рис.3 Эволюция эйлеровой характеристики во времени для АО 9393. Стрелками указаны моменты вспышек: класса М-тонкие и Х-жирные линии.

С другой стороны, серия вспышек начинается или сопровождается значительным увеличением периметра (Рис.4) на всех уровнях. Напомним, что такое увеличение эквивалентно возрастанию полной вариации поля, т.е. интеграла от модуля (горизонтального) градиента радиальной компоненты напряженности. Эти эффекты отсутствуют для вспышечно спокойных АО.

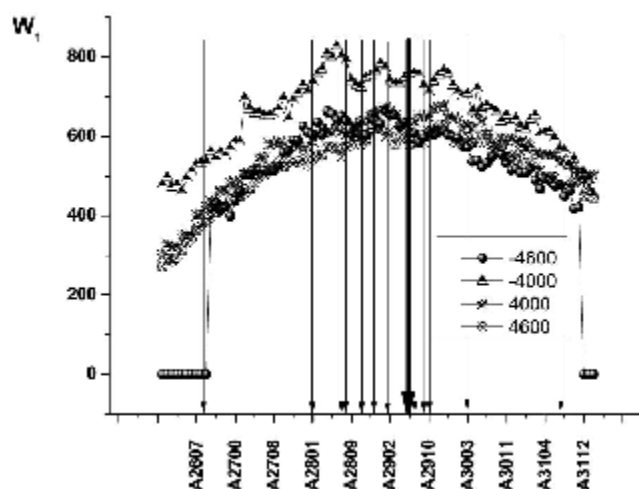


Рис.4. Эволюция периметра во времени для АО 9393. Стрелками указаны моменты вспышек: класса М-тонким, Х-жирными.

Полученные результаты указывают, что на прогностические возможности предложенного описания.

Таким образом, в рамках геометрии случайных полей получено описание эволюции АО и фона. Обнаружено, что топологические характеристики поля в обоих случаях одинаковы и могут быть аппроксимированы моделями логнормального типа. Кроме того, обнаружена связь между вариациями функционалов и вспышечно активной АО.

Б) Моделирование потока экстремальных событий методами фрактальной геометрии

В этой задаче исследования проводились в двух направлениях. Первое из них связано с исследованием скейлинговых свойств палеоклиматических данных. Эта работа выполнялась совместно финскими дендрохронологами и полученные результаты представлены в совместной статье [Helama et al., 2009]. Второе направление связано с

исследованием статистик экстремальных событий космической погоды. Здесь наша роль заключалась лишь в технической консультации исследований проводимых группой И.С. Веселовского [Яковчук и др., 2009].

Helama, S., Makarenko, N. G., Karimova L. M., Kruglun, O. A., Holopainen, J., Mielikäinen, K., Timonen, M., Meriläinen, J. & Eronen, Dendroclimatic transfer functions revisited: Little Ice Age and Medieval Warm Period summer temperatures reconstructed using artificial neural networks and linear algorithms// Ann. Geophys., 2009. V.27, P.1097–1111,

Макаренко Н.Г. Геометрия изображений.// НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2009 XI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ Лекции по Нейроинформатике. Москва, МИФИ С.89-125

Макаренко Н.Г., Князева И.С. Мультифрактальный анализ цифровых изображений. //Изв.вузов. Прикладная Нелинейная Динамика. 2009.т.17. с.84-97

Макаренко Н.Г. Современные методы обработки астрономических данных: геометрия из временных рядов.//Астрономические исследования в Пулковке сегодня. Санкт-Петербург. 2009 с.130-143

Н.Г. Макаренко Паттерны порядка во временных рядах Нейроинформатика 2009. Москва МИФИ . 27 - 30 января 2009 г. (Лекция)

Макаренко Н.Г., Марковский прогноз экстремальных событий методами фрактальной геометрии. Конференция Физика Плазмы в Солнечной Системе. Москва. ИКИ 17-20 февраля 2009 (Приглашенный доклад)

Князева И.С., Макаренко Н.Г., Методы паттернов порядка в диагностике и прогнозе скалярных временных рядов. Конференция Физика Плазмы в Солнечной Системе. Москва. ИКИ 17-20 февраля 2009 (Доклад)

Н.Г.Макаренко Мультифрактальный анализ цифровых изображений. Международная школа-семинар "Статистическая физика и информационные технологии" (StatInfo-2009) . Саратов., 2 - 5 июня 2009 года (Лекция)

Н.Г.Макаренко Математические аспекты моделирования цифровых изображений. Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009". 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН (Доклад)

Яковчук О.С., Веселовский И.С., Макаренко Н.Г Статистические характеристики экстремальных событий в параметрах космической погоды Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009". 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН (Доклад соавтора)

Мильков Д.А., Князева И.С., Каримова Л.М. Комплекс программ для оценки скейлинговых, топологических и морфологических характеристик цифровых изображений Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца "Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009". 5-11 июля 2009 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН (Доклад аспиранта)

Макаренко Н.Г. Геометрия и топология цифровых изображений. Байкальская Школа по Фундаментальной Физике Иркутск. 6-12 сентября 2009г. (Лекция)

6.2. Нелинейные структуры в магнитосфере Земли

6.2.1. Исследование флуктуаций скорости плазмы в плазменном слое магнитосферы на базе данных измерений в проекте ИНТЕРБОЛ

Получено глобальное статистически усредненное распределение коэффициента вихревой диффузии в плазменном слое магнитосферы Земли во время магнитосферной суббури. Проведен анализ зависимости коэффициента вихревой диффузии на различных геоцентрических расстояниях в плазменном слое магнитосферы Земли во время магнитосферных суббурь. Использована база данных спутника Интербол/Хвостовой зонд. Проведен анализ флуктуаций скорости плазмы, определяемых по результатам измерений прибора КОРАЛЛ. Определялись амплитуды флуктуаций и автокорреляционное время. Получены значения коэффициентов диффузии в Z и X направлениях. Исследована зависимость данных коэффициентов от фазы суббури и геоцентрического расстояния. Показано, что коэффициенты диффузии возрастают с ростом геоцентрического расстояния.

Stepanova M., E. E. Antonova, D. Paredes-Davis, I. L. Ovchinnikov, and Y. I. Yermolaev, Spatial variation of eddy-diffusion coefficients in the turbulent plasma sheet during substorms, Ann. Geophys., 27, 1407–1411, 2009.

Antonova E.E., M.V. Stepanova, Yu.I. Yermolaev, D. Paredes-Davis, I.P. Kirpichev, S.S. Rossolenko, I.L. Ovchinnikov, K.G. Orlova, M.S. Pulinets, Turbulence in the magnetosphere of the Earth, Results of theoretical analysis and Interball observations, Proceedings of the International Conference "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence" (MSS-09), Moscow, Space Research Institute of RAS, 23 - 25 November 2009, p. 346-351.

Paredes-Davis D., M.V. Stepanova, E.E. Antonova, I.L. Ovchinnikov, Study of the properties of turbulent plasma sheet during substorm using Interball/Tail satellite data, Nonlinear magnetosphere Conference, Schedule of talks, January 19-23, 2009, Vina del Mar, Chile, p. 38.

Stepanova M.V., E.E. Antonova, Turbulent properties of the plasma sheet during quiet and disturbed geomagnetic conditions, Nonlinear magnetosphere Conference, Schedule of talks, January 19-23, 2009, Vina del Mar, Chile, p. 43.

6.2.2. Динамика магнитного поля в околоземной плазме для случайного гауссового дивергентного поля скорости.

Рассматривается динамика магнитного поля в случайном гауссовом, дельта-коррелированном во времени, дивергентном поле скоростей в отсутствие эффекта молекулярной диффузии. Получено уравнение для плотности вероятностей энергии магнитного поля. С помощью этого уравнения вычислены основные статистические характеристики энергии. На основе идей статистической топографии изучены процессы усиления магнитного поля в пространстве и, в частности, условия возникновения кластерной структуры. Эти явления являются когерентными, осуществляются с вероятностью единица и, следовательно, проявляются почти во всех отдельных реализациях процесса. Эффект кластеризации продемонстрирован на точном решении для динамики магнитного поля для простейшей модели анизотропного случайного дивергентного поля скорости.

На основании определённой аналогии физических условий в области верхней атмосферы, переходной от мезосферы к нижней термосфере, и атмосферном пограничном слое впервые для верхней атмосферы получены оценки спиральности и проанализированы неустойчивости экмановского типа. Проведенные расчеты устойчивости для широкого диапазона граничных условий продемонстрировали, в частности, близость ориентации и масштабов образующихся при этом периодических структур с экспериментальными данными по наблюдениям структур в верхней атмосфере.

В.И.Кляцкин, О.Г.Чхетиани. О диффузии и кластеризации магнитного поля в случайных полях скоростей. ЖЭТФ, т.136(2), с.400-411, 2009.

6.2.3. Плазменное эхо и диагностика методов линеаризации интегралов столкновений в кинетических уравнениях.

В настоящее время имеются два метода линеаризации кинетического уравнения для возмущений в плазме. Первый, исторически сложившись, давно общепринят и используется повсеместно, включая задачу линейного отклика. Считается, что с включением возмущения, например, слабого электрического поля, достаточно полученные в нулевом приближении по полю (т.е. в его отсутствие) интегралы столкновений Ландау (Балеску-Ленарда, Больцмана) дополнить уравнением Власова и, назвав такую модель обобщенным кинетическим уравнением Власова-Ландау, линеаризовать его по полю. Такая простота собственно и сделала интеграл столкновений Ландау знаменитым, а его работу наиболее цитируемой. Но у этого метода существенный недостаток - отсутствует эффект Крамерса-Гинзбурга: эффективные частоты столкновений, задающие мнимую часть диэлектрической проницаемости, не зависят от частоты поля. Потому и появились ограничения на частоту Ω и волновое число q , которые

для электронной плазмы ($qv_T \ll \Omega_p$, $\Omega \ll \Omega_p$, $v_T = \sqrt{T/m}$ - тепловая скорость электронов при температуре T , Ω_p - ленгмюровская частота) делают интеграл столкновений Ландау-Балеску-Ленарда неприменимым даже для ленгмюровских волн поскольку их частота $\Omega \geq \Omega_p$ при $qv_T < \Omega_p$. Другой метод, исходящий из флуктуационной природы интегралов столкновений, наоборот, изначально, еще с уравнения Лиувилля исследует это слагаемое с электрическим полем. Линеаризуя по нему уравнения для функции распределения и самосогласованных полей (для средних их значений и флуктуаций), адекватно учитывает начальные условия. Они разные: ненулевые для равновесных флуктуаций и нулевые для добавок к ним (возмущений). В работе показано: этого достаточно, чтобы в интегралах столкновений для линейной по полю добавки проявился эффект Крамерса-Гинзбурга (без каких-либо ограничений по частоте поля), а их форма оказалась диффузионной. Это существенно отличается от фоккер-планковской формы, которая присуща интегралам Ландау-Балеску-Ленарда и неизбежно остается при их линеаризации по 1-му методу. Из данного анализа следует, что этого достаточно, чтобы признать несостоятельным общепринятое дополнение уравнений Власова интегралами столкновений Ландау (Балеску-Ленарда). Ведь в однородной и изотропной плазме без внешнего поля, где только и могут иметь место интегралы такого типа, нет, и не может быть среднего самосогласованного поля. Эти поля появляются лишь с включением внешнего возмущения. Но здесь интегралы столкновений Ландау-Балеску-Ленарда уже неприменимы поскольку в линейных по полю уравнениях интегралы качественно от них отличны, имея совсем иную (диффузионную) форму.

Предложен, кроме того, эксперимент по диагностике этих двух методов линеаризации: только фоккер-планковская форма, получающаяся в первом методе, приводит к сдвигу времени появления плазменного эха.

Туганов В.Ф. Международная конференция волн, когерентные структуры и турбулентность, сборник трудов, Москва, Издательство URSS, 2009, с.100-105

Туганов В.Ф. Международная конференция волн, когерентные структуры и турбулентность, сборник трудов, Москва, Издательство URSS, 2009, с.147-152

Заключение

Работы по программе ОФН-15 показали эффективность и результативность решения Президиума РАН об организации работ по программам отделений. На успех Программы, подтверждающий лидирующую роль РАН в проведении фундаментальных исследований по тематике ОФН-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 «Плазменные процессы в солнечной системе» (ОФН-15) в 2010 году.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
средств по организациям-исполнителям заданий
Программы фундаментальных исследований Отделения физических
наук РАН
«Плазменные процессы в солнечной системе» на 2009 год
(название программы)

№ п/п	Наименование организации	Объем финансирования (тыс. рублей) в 2009 году
1.	Институт космических исследований	2870
2.	Институт прикладной физики	1750
3.	Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн	950
4.	Институт радиотехники и электроники	960
5.	Институт общей физики	530
6.	Физический институт	150
7.	Главная астрономическая обсерватория	510
8.	Специальная астрофизическая обсерватория	490
9.	Пушинская радиоастрономическая обсерватория	320
10.	Полярный геофизический институт	470
	Итого	9000

Структура программы исследований

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

1. Физические процессы во внешних областях Солнца

Руководители проекта: **А.В. Степанов, В.М. Богод**

1.1. Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы

- Анализ активных плазменных структур на Солнце по данным спектрально-поляризационных радионаблюдений. (рук. Г.Б. Гельфрейх)
- Исследование условий формирования открытых и замкнутых магнитных конфигураций в активных областях Солнца по данным многооктавным поляризационным радионаблюдениям (В.М. Богод)
- Описание структуры и топологических изменений солнечных корональных стримеров и дальней области геомагнитного хвоста в рамках кинетической теории бесстолкновительной плазмы (.М.Губченко)
- Исследование квазистационарных источников солнечного ветра и анализ динамических процессов в солнечной короне по наблюдениям солнечной короны в рентгеновском и ВУФ-диапазонах спектра (С.В.Кузин)
- Топология и динамика глобальных магнитных полей Солнца, их связь с характеристиками гелиосферы. (Е. А. Гаврюсева)
- Квазистационарные структуры в солнечной атмосфере как источник истечения корональной плазмы (В. Н. Обридко)

1.2. Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений

- Природа корональных выбросов, СКЛ и нагрев короны. (А.В. Степанов)
- МГД-моделирование структуры и динамики петельного коронального выброса массы (А. А. Соловьев)
- Механизмы генерации корональных и межпланетных возмущений (В.В. Зайцев)
- Механизмы генерации корональных выбросов массы и других возмущений в солнечной атмосфере, сопровождающих солнечные вспышки, (ударные волны, ускоренные частицы). (В. В. Фомичев)

2. Физические процессы в гелиосфере

Руководитель проекта: **Ю.И. Ермолаев**

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

- режимы истечения и турбулентности солнечного ветра по данным экспериментов радиозондирования когерентными сигналами космических аппаратов (Н.А. Арманд)
- изучение динамики крупномасштабной структуры солнечного ветра (Ю.И. Ермолаев)

2.2. Динамические процессы в межпланетной плазме

- изучение быстрых вариаций параметров солнечного ветра (Г.Н. Застенкер)
- турбулентность, крупномасштабная структура и динамика солнечного ветра по радиоастрономическим данным (И.В. Чашей)
- магнитогидродинамическое рассмотрение разрывных структур в межпланетной плазме (С.А. Гриб)

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

- изучение фундаментальных свойств внешней гелиосферы (В.В. Измоденов)
- мелкодисперсные частицы и пылевая плазма в гелиосфере (С.И. Попель)

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

- экспериментальное и теоретическое исследование околопланетных ударных волн (М.И. Веригин)

3. Динамика магнитосфер Земли и планет

Руководитель проекта: **А.Г.Демехов**

3.1. Передача энергии и импульса от солнечного ветра в магнитосферу

- изучение влияния на переход в режим супердиффузии внешних факторов, динамических и нелинейных эффектов и перемежаемых потоков плазмы солнечного ветра на границе земной магнитосферы (С.П. Савин).
- воздействие солнечного ветра (и солнечной активности) на магнитосферно-ионосферную систему Земли (Б.В. Козелов)

3.2. Динамика токовых слоев в хвосте и на границах магнитосферы

- исследование структуры и устойчивости токовых слоев в магнитосферах планет (Малова Х.)
- экспериментальное исследование и моделирование структуры и динамики плазменного и токового слоя магнитосферы (А.Г.Яхнин)
- экспериментальное и теоретическое исследование процессов ускорения заряженных частиц в токовом слое геомагнитного хвоста. (Григоренко Е.Е.)

3.3. Исследование взаимодействия потоков заряженных частиц с электромагнитными волнами

- исследование механизмов взаимодействия заряженных частиц плазмы с турбулентными электромагнитными полями (Л.М. Зеленый)
- экспериментальный анализ различных динамических режимов циклотронного взаимодействия волн и частиц в магнитосфере и количественное сравнение результатов эксперимента с моделями (Е.Е. Титова)
- динамика электромагнитных волн в плазме с нестационарными возмущениями параметров и потоками заряженных частиц (А.В. Костров)
- генерация, эффекты и диагностика электромагнитных полей и волн в космической плазме: теория и лабораторное моделирование (А.Г. Демехов)
- развитие теории генерации шумовых и дискретных излучений и сравнительный анализ их свойств в магнитосферах планет. Влияние коллективных эффектов на динамику энергичных частиц в магнитосферах. (А.Г. Демехов)

3.4. Динамика радиационных поясов Земли и Юпитера

- изучение механизмов генерации дециметрового радиоизлучения планеты Юпитер (В.Е. Шапошников)
- исследование формирования радиального распределения концентрации фоновой плазмы в дисках вращающихся магнитосфер планет-гигантов (С.С. Давыденко)

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

- процессы ускорения в индуцированных магнитосферах Марса и Венеры (А.А. Скальский).
- антенные методы диагностики электромагнитных излучений в плазме солнечного ветра, в магнитосфере и ионосфере Земли (В.Е. Чугунов)
- изучение количественных моделей некоторых коллективных процессов в планетарных магнитосферах и космической плазме (П.А. Беспалов)

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

4.1. Исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра

- исследование отклика системы ионосфера-атмосфера Земли на воздействие солнечного ветра и ультрафиолетового излучения Солнца с помощью высокостабильных сигналов радионавигационных систем на трассах СПУТНИК-СПУТНИК по данным **2002-2008** гг. (А.Г. Павельев)
- исследование влияния солнечного ветра на ионосферу Земли по данным навигационных спутниковых систем (Н.А. Арманд).
- 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 (Н.А. Арманд).

5. Лабораторное моделирование плазменных процессов

5.1. Лабораторное моделирование нестационарных явлений вспышечного типа и радиовсплесков

- лабораторное моделирование нестационарной динамики токовых слоев и генерации радиовсплесков (А.Г.Франк)

5.2. Моделирование динамики волн в магнитосфере и ионосфере

- экспериментальное моделирование нестационарных (вспышечных) процессов генерации электромагнитных волн в плазменном циклотронном лазере, активной средой которого является двухкомпонентная неравновесная плазма ЭЦР разряда в магнитной ловушке. (С.В.Голубев)

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

6.1. Многомасштабные каскадные процессы в физике Солнца и солнечного ветра

- мультифрактальная диагностика физических процессов в гелиосфере (Н.Г. Макаренко)

6.2. Нелинейные структуры в магнитосфере Земли

- динамические явления саморегуляции в хвосте магнитосферы и авроральной зоне (Б.В. Козелов)