### Направление 2. Солнце и гелиосфера

Кураторы направления: Ю.И. Ермолаев (ИКИ), А.В. Степанов (ГАО)

2.1	Проект 2.1: Солнечные вспышки, сопровождающиеся жестким гамма излучением >100 МэВ	Струминский А.Б., Зимовец И.В., Ерохин Н.С.
2.2	Проект 2.2: Влияние анизотропии свойств переноса в магнитном поле на взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой, планетами и кометами	Баранов В.Б
2.3	Проект 2.3: Исследование формирования солнечного ветра в короне и статистических параметров его турбулентности в гелиосфере	Слемзин В.А., Чашей И.В.
2.4	Проект 2.4: Исследование явлений нестационарного взаимодействия солнечного ветра с околоземной ударной волной	Вайсберг О.Л.
2.5	Проект 2.5: Поиск механизмов ускорения солнечного ветра на основе материалов радиозондирования, полученных с использованием космических аппаратов в течение трех циклов солнечной активности (1975-1984; 1994-2005; 2006-2013)	Яковлев О.И., Ефимов А.И.
2.6	Проект 2.6: Исследование пространственного и энергетического распределения межзвездного водорода в солнечном ветре	Измоденов В.В.
2.7	Проект 2.7: Новые методы и технологии построения изображений Солнца со сверхвысоким пространственным разрешением в ходе космических экспериментов	Кузин С.В., Богачев С.А.
2.8	Проект 2.8: Теория, экспериментальные исследования и численное моделирование магнитогидродинамической турбулентности в солнечном ветре и образование ударных волн в астрофизических объектах	Сон Э.Е.
2.9	Проект 2.9: Средние физические характеристики пятен в изменениях солнечной активности	Наговицын Ю.А., Тлатов А.Г.
2.10	Проект 2.10: Исследования процессов ускорения ионов и электронов в солнечных вспышках по результатам измерений рентгеновского и гамма-излучения в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД и в экспериментах ГЕЛИКОН и ИРИС на солнечной обсерватории «КОРОНАС-Ф»	Чариков Ю.Е.
2.11	Проект 2.11: Выявление вклада естественных и антропогенных факторов в изменения глобального климата Земли, оценка возможных климатических последствий различных солнечно-космических явлений и разработка сценариев возможной эволюции климата Земли в 21-м веке на основе анализа инструментальных, исторических и палеоданных об изменении ряда природных характеристик	Дергачев В.А.

2.12	Проект 2.12: Исследование ультратонких хромосферных	Зайцев В.В.
	петель и их вспышечной активности	
2.13	Проект 2.13: Глобальные комплексы активности и	Обридко В.Н.,
	соотношение магнитных полей различных пространственных	Кузнецов В.Д.
	масштабов	
2.14	Проект 2.14: Исследование геоэффективности	Ермолаев Ю.И.,
	крупномасштабных структур солнечного ветра	Веселовский И.С.,
		Застенкер Г.Н.
2.15	Проект 2.15: Эруптивные явления на Солнце и их роль в	Фомичев В.В.,
	формировании космической погоды	Белов А.В.
2.16	Проект 2.16: Физические процессы в атмосфере Солнца:	Степанов А.В.
	плазменные неустойчивости, МГД-волны, нагрев плазмы и	
	электромагнитное излучение	
2.17	Проект 2.17: Физика магнитосфер активных областей в	Богод В.М.
	переходной области хромосфера-корона и нижней короны	
	Солнца по микроволновым наблюдениям	
2.18	Проект 2.18: Ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы в	Соловьев А.А.
	нестационарных процессах на Солнце и новые физические	
	модели активных образований	

Проект 2.1. Солнечные вспышки, сопровождающиеся жестким гамма излучением >100 МэВ

Тема 2.1.1. Солнечные вспышки, сопровождающиеся жестким гамма излучением

>100 МэВ и развитие методов модуляционных коллиматоров для солнечных

телескопов жесткого рентгеновского диапазона

### Цель работы:

A) Исследовать особенности солнечных вспышек, в которых LAT FermiGRO регистрирует жесткое гамма излучение >100 МэВ.

Б) Разработать инструментарий (математическую теорию и программное обеспечение) для

оптимизации модуляционных систем (коллиматоров) для компактных солнечных

телескопов-спектрометров жесткого рентгеновского диапазона.

### Ожидаемые в конце 2015 г. научные результаты:

1) В конце 2015 года будут подробно проанализированы 2-3 события из списка (Ackermann M., et al., 2014).

2) Будет разработан математический аппарат для расчета функций рассеяния точки модельных телескопических систем на основе различных модуляционных коллиматоров.

3) Будет разработана предварительная версия пакета программного обеспечения для численной реализации разработанного математического аппарата.

### Результаты работы за 2015 г.:

Детального анализа 2-3 событий из списка (Ackermann M., et al., 2014) проведено не было ввиду отсутствия финансирования, грубый анализ этих событий показал:

• Высокоэнергичное солнечное γ-излучение, наблюдавшееся LAT/FermiGRO в импульсной фазе вспышек сопровождалось HXR излучением >100 кэВ (наблюдения GBM/FermiGRO и/или ACS SPI, но жесткое рентгеновское излучение не наблюдалось в длительной фазе спада.

• Процессы ускорения протонов и электронов должны быть различны в импульсной и длительной фазах и/или удержание протонов должно быть более эффективным, чем электронов.

• Отмечено, что разница между временами роста до максимума температуры и меры эмиссии больше для вспышек с длительным высокоэнергичным γ-излучением, которые также сопровождаются мощными протонными событиями.

• Частично разработан математический аппарат и программное обеспечение для расчета функций рассеяния точки модельных телескопических системам на основе модуляционных коллиматоров Фурье-типа.

• Предложена концепция создания телескопа-спектрометра жесткого рентгеновского диапазона для изучения солнечных вспышек на малоразмерных космических платформах.

Руководители проекта: А.В. Струминский, И.В. Зимовец (ИКИ РАН).

### Публикации:

1. Struminsky A. and Gan W. Observation of solar high energy gamma and X-ray emission and solar energetic particles // J. Phys.: Conf. Ser. 2015 V. 632. Article number: 012081. DOI: 10.1088/1742-6596/632/1/012081

2. Богачев С.А., Зимовец И.В., Кириченко А.С., Кузин С.В., Струминский А.Б. Возможности по созданию компактного телескопа-спектрометра жесткого рентгеновского диапазона для изучения солнечных вспышек на малоразмерных космических платформах. В "Исследования солнечно-земных связей на микро-, нано- и пикоспутниках: Материалы научной сессии Секции солнечно-земных связей Совета по космосу Российской академии наук". Под ред. А.А. Петруковича. М.: ИКИ РАН, 2015.

## Тема 2.1.2. Решение проблемы наблюдаемой переменности спектров космических лучей для энергий до 10<sup>17</sup> эВ.

Предложено решение проблемы переменности энергетических спектров космических лучей (КЛ) (р – протонов, и Не – ядер гелия) по результатам анализа большого количества экспериментов в диапазоне энергий от 10 ГэВ до ~ 10<sup>7</sup> ГэВ на основе гипотезы существования (кроме постоянного фона) двух близких (к Солнцу) переменных источников КЛ. Первый "мягкий" серфотронный источник (размером ~ 100 а.е.) находится на периферии гелиосферы. Второй "жесткий" серфотронный источник (размером  $\sim 1$  пс) находится в местном межзвёздном облаке (MMO) на расстоянии < 1 пс. Постоянный фон описывается степенным спектром с наклоном ~ 2.75. Переменный гелиосферный серфотронный источник описывается степенным спектром (с переменными амплитудой, наклоном и энергией обрезания) с максимальной энергией обрезания в области E<sub>CH</sub> / Z < 1000 ГэВ. Переменный серфотронный источник в ММО (LIC) описывается степенным спектром (с переменными амплитудой, наклоном и энергией обрезания) с максимальной энергией обрезания E<sub>CL</sub> / Z меньше или порядка 3·10<sup>6</sup> ГэВ. Проведена аппроксимация данных нескольких экспериментов (близких по времени проведения). Вычислена энергия каждой компоненты. Сделаны предсказания о возможности серфотронного ускорения ядер Fe (Z = 26) в ММО вплоть до энергии порядка E<sub>ситст.</sub> ~ 10<sup>17</sup> эВ, а электронов и позитронов до энергии "колена". Показана возможность захвата, удержания и ускорения заряженных частиц КЛ квазипродольной плазменной волной (КППВ) на основе численного решения нелинейных уравнений, описывающих резонансное (черенковское) взаимодействие волны и заряженной частицы с набором энергии до  $E / Z \sim 3 \cdot 10^6 \Gamma$ эВ.

Таким образом, различие в экспериментально наблюдаемых спектрах р и Не, является следствием переменности физических условий в 2-х серфотронных источниках: на периферии гелиосферы, за областью пересечения граничной ударной волны с солнечным ветром (TS), ("мягкая компонента" E / Z < 1 ТэВ); и в местном межзвёздном облаке ("жёсткая компонента"  $E / Z < 3 \cdot 10^3$  ТэВ). Необходимо указать, что вблизи границы ММО имеется подходящая структура магнитного поля для удержания и ускорения заряженных частиц. Для работы серфотронного механизма ускорения частиц необходимы квазипродольные плазменные волны с фазовой скоростью  $\omega / k < c$ . Источником энергии для генерации КППВ могут служить: для "мягкого" источника – солнечные вспышки; для "жёсткого" источника – ударные волны, возникающие при столкновении двух облаков LIC и G в местном пузыре. Очевидно, что КППВ достаточной амплитуды появляются и

существуют не постоянно и, соответственно, условия для ускорения КЛ с помощью КППВ переменны во времени. Поэтому переменность спектра КЛ от близких источников является естественным следствием модели серфотронного ускорения. Очевидно, что амплитуда и поперечный размер КППВ являются переменными параметрами. Поперечный размер КППВ определяет максимальную длительность ускорения и, соответственно, максимальную энергию обрезания, а амплитуда КППВ – возможность захвата частиц волной в режим серфотронного ускорения.

### Руководитель проекта: Ерохин Н.С.

Состав группы: Лозников В.М., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.

#### Публикации:

1. В. М. Лозников, Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. Серфотронный ускоритель в местном межзвездном облаке. Физика плазмы, 2015, принята к печати.

2. В. М. Лозников, Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. О причине излома в спектрах жесткости космических лучей протонов и ядер гелия около 230 ГВ. Физика плазмы, 2015, т.41, № 8, с. 693-701.

3. V. M. Loznikov, N. S. Erokhin, N. N. Zol'nikova, and L. A. Mikhailovskaya. On the Origin of a Kink in the Hardness Spectra of Cosmic-Ray Protons and Helium Nuclei in the Vicinity of 230 GV. Plasma Physics Report, 2015, v, 41, № 8, p.637-644.

### Доклады на конференциях:

В.М. Лозников, Н.С. Ерохин, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская. Серфотронный ускоритель в LIC. Научная сесия НИЯУ МИФИ-2015, Аннотации докладов, Москва, НИЯУ МИФИ, 2015, т.1, с. 53.

### Проект 2.2. Влияние анизотропии свойств переноса в магнитном поле на взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой, планетами и кометами

Работа по Программе 9 за отчетный период времени велась по двум направлениям: (а) влияние магнитного поля на взаимодействие солнечного ветра с кометами малой производительности (малое количество испаряющегося газа с поверхности кометы в перигелии) и (б) проведение интерпретации экспериментальных данных, получаемых на

космических аппаратах Вояджер-1 и Вояджер-2 на основе выполненных исполнителями гранта теоретических работ.

### **Тема 2.2.1. Влияние магнитного поля на взаимодействие солнечного ветра с** кометами малой производительности.

Аннотация. Построена трехмерная магнитогидродинамическая (МГД) модель взаимодействия солнечного ветра с кометами малой активности испарения.

Первое направление связано с актуальной проблемой исследования обтекания солнечным ветром кометы Чурюмова-Герасименко, которое проводится в настоящее время при помощи приборов, установленных на космическом аппарате «Розетта». На примерах исследования обтекания комет Галлея и Григга-Шеллерупа солнечным ветром показано, что разработанная 3D МГД модель дает результаты, хорошо совпадающие с данными экспериментов, которые получены при помощи аппарата «Джотто». На основе такого совпадения были даны предсказания кометоцентрического расстояния и формы головной ударной волны и кометопаузы для кометы Чурюмова-Герасименко.

### Руководитель проекта:

Баранов Владимир Борисович, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, baranov@ipmnet.ru

Состав группы: Баранов В.Б., Алексашов Д.Б., Белов Н.А., Измоденов В.В., Чалов С.В.

### Публикации:

Baranov V.B., Alexashov D.B., Lebedev M.G., MNRAS, v. 449, pp. 2268-2273, 2015.
 Lebedev M.G., Baranov V.B., Alexashov D.B., Earth, Moon and Planets, v.116, pp. 159-179, 2015.

# Тема 2.2.2. Проведение интерпретации экспериментальных данных, получаемых на космических аппаратах Вояджер-1 и Вояджер-2 на основе выполненных исполнителями гранта теоретических работ.

По второму направлению на основе теоретических моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, разработанных исполнителями Программы, была подвергнута сомнению интерпретация данных о пресечении гелиопаузы (границы солнечного ветра и межзвездной среды) аппаратом Вояджер-1 в 2012 году, сделанная на

основе измерения потоков энергичных заряженных частиц и магнитного поля (на этом аппарате приборы, измеряющие макроскопические параметры плазмы, вышли из строя).

В августе 2012 г. КА Вояджер-1 при приближении к гелиопаузе зафиксировал резкое снижение потоков протонов с энергиями от 0.1 до ~ 10 МэВ, ускоренных на гелиосферной ударной волне (Stone et al. 2013, Science; Krimigis et al. 2013, Science). Часть гелиосферного научного сообщества объяснила эти измерения пересечением аппаратом гелиопаузы, т.е. переходом из области, занятой солнечным ветром, в межзвездную среду. Мы показываем, что резкое уменьшение потоков гелиосферных протонов данных энергий может происходить и по другой причине, не имеющей никакого отношения к гелиопаузе.

Участниками проекта (Chalov et al. 2015, MNRAS) исследовался процесс дрейфового ускорения захваченных межзвездных протонов на гелиосферной ударной волне. В работе ударная волна считается МГД разрывом. Тепловые скорости стандартных захваченных протонов не превышают скорости солнечного ветра, но на порядок превышают тепловые скорости оригинальных солнечных протонов. Именно поэтому они и рассматриваются в качестве основных кандидатов для дрейфового ускорения, поскольку эффективность этого ускорения зависит от начальной скорости (тепловой) частиц. Другим определяющим фактором, влияющим на эффективность ускорения, является угол между магнитным полем и нормалью к разрыву (нормальный угол). В тех областях гелиосферной ударной волны, где производились измерения потоков энергичных протонов на КА Вояджер-1/2, ударная волна была почти перпендикулярной, т.е. нормальный угол был близок к 90°. При данных условиях процесс дрейфового ускорения неэффективен (для конкретных величин тепловых скоростей). В работе Chalov et al. 2015 были учтены эффекты, связанные с влиянием вариаций направления магнитного поля вблизи ударной волны (по измерениям на Вояджерах-1/2), на эффективность дрейфового ускорения. Основной вывод данной работы заключается в том, что учет вариаций направления магнитного поля приводит к увеличению потоков протонов, ускоренных на ударной волне, на несколько порядков (и эти потоки хорошо согласуются с измеряемыми).

Основным фактором, влияющим на изменение направления магнитного поля, является гелиосферный токовый слой. Его гелиоширотная протяженность изменяется со временем, и, если Вояджеры во время пересечения гелиосферной ударной волны находились в областях, занятых токовым слоем, то все измерения потоков энергичных протонов имеют естественное теоретическое объяснение. Иными словами, весь внутренний ударный слой можно разделить на две области: низкоширотная область, занятая токовым слоем, и

высокоширотная область, где вариации магнитного поля хотя и есть, но их интенсивность мала. Возникает следующая качественная картина за гелиосферной ударной волной: в области, занятой токовым слоем, потоки энергичных протонов на много порядков превышают соответствующие потоки на высоких гелиоширотах. Если Вояджер 1 в какойто момент времени вышел из области токового слоя, то потоки энергичных протонов, измеряемых его приборами, резко упадут. Приведенный рисунок качественно иллюстрирует этот эффект.



Вывод о выходе аппарата Вояджер-1 в межзвездную среду в 2012 году на основе измерений флуктуаций электрического поля в килогерцовом диапазоне, интерпретация которых приводит к сильному увеличению концентрации электронов, также вызывает большие сомнения, поскольку, как показано еще в работе Baranov& Malama (Space Sci. Rev., 1996), резкое возрастание электронной концентрации может происходить в солнечном ветре перед гелиопаузой за счет ионизации атомов Н электронным ударом, а термодинамические параметры плазмы в солнечном ветре и в межзвездной среде могут быть вблизи гелиопаузы очень близки друг к другу вследствие эффектов резонансной перезарядки (Belov & Ruderman, MNRAS, 2009).

Кроме того, гелиопауза может иметь сложную структуру вследствие анизотропии теплопроводности и электропроводности в магнитном поле, толщина которой определяется макроскопическими параметрами плазмы вблизи гелиопаузы. Эти параметры не измеряются на аппарате Вояджер-1.

### Руководитель проекта:

Баранов Владимир Борисович, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, baranov@ipmnet.ru

Состав группы: Баранов В.Б., Алексашов Д.Б., Белов Н.А., Измоденов В.В., Чалов С.В.

### Публикации:

1. Chalov S.V. et al., MNRAS, v. 455, pp. 431-437, 2015.

2. Baranov V.B., IAGA Symposium, "Crossing the heliopause into the interstellar medium (Div.

IV), Prague, 27 June, 2015.

3. Baranov V.B., International Conference "New Paradigms for the Heliosphere",

Germany, Bad Honnef (29 June – 3 July, 2015). Invited talk.

Проект 2.3. Исследование формирования солнечного ветра в короне и статистических параметров его турбулентности в гелиосфере.

## Тема 2.3.1. Анализ параметров солнечного ветра, его источников в 24-ом цикле солнечной активности.

Аннотация. По данным со спутников АСЕ, Wind, STEREO, SDO проведен статистический анализ параметров CB, его источников в короне и геоэффективности в 24м цикле солнечной активности. Установлено, что корональными источниками наиболее сильных магнитных бурь с индексом Dst < -40 нT в 2007 – 2015 г.г. в более 70% случаев явились межпланетные выбросы массы (МКВМ), ассоциированные со вспышками и корональными выбросами массы (КВМ) и проявившиеся в виде транзиентных потоков солнечного ветра типа магнитных облаков, MO+sheath, sheath. На основе анализа ионного состава этих транзиентных потоков было найдено, что ионные отношения C6/C5, O7/O6 и средний заряд ионов железа QFe в 24-м цикле меньше, чем в предыдущем 23-м цикле, что связано с более низкой температурой корональной плазмы. Путем сопоставления параметров плазмы корональных выбросов с ионным составом транзиентных потоков CB было установлено, что источниками геомагнитной бури 5 – 6 августа 2011 г. послужили солнечные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ) 2, 3 и 4 августа 2011, из которых наиболее сильное влияние оказали вспышка и KBM 2 августа.

### Содержание работы

Для надежного прогнозирования геомагнитных явлений, вызываемых транзиентными потоками солнечного ветра (CB), связанными со спонтанными явлениями солнечной активности, большое значение имеет идентификация корональных источников этих

потоков. Обычно используемые для такой цели параметры СВ, как напряженность межпланетного магнитного поля, скорость, плотность и кинетическая температура протонов не всегда однозначно определяют источник транзиента, поскольку эти параметры могут значительно изменяться в гелиосфере при взаимодействии транзиента с фоновым СВ, высокоскоростными квазистационарными потоками от корональных дыр и другими межпланентными выбросами массы. В настоящей работе рассматривается использование для идентификации ионного состава СВ, который определяется параметрами плазмы в источнике и окончательно устанавливается («замораживается») в короне на расстояниях менее 3 – 4 солнечных радиусов. В работе был проведен статистический анализ наиболее геоэффективных транзиентных потоков СВ 24-го цикла солнечной активности (2007 – 2015 г.г.), вызвавших умеренные и сильные магнитные бури с индексом Dst < -40 нТ. По каталогу программы ISEST Master CME list http://solar.gmu.edu/heliophysics/index.php/The\_ISEST\_Master\_CME\_List было выделено 65 таких событий и проведена их классификация по типу солнечного ветра. В более чем 70% случаев геоэффективные транзиентные потоки классифицировались, как магнитные облака, sheaths и их сочетания, связанные с солнечными вспышками и КВМ. Для этих потоков значения ионных отношений C6/C5, O7/O6 и средним зарядом QFe оказались заметно ниже разброса значений для более мощного 23-го цикла, что связано с пониженной температурой корональной плазмы в 24-м цикле. Для установления связи между параметрами корональной плазмы и ионным составом СВ были детально исследованы транзиентные потоки, приведшие к сильной геомагнитной буре (Dst = -113 нT) 5 – 6 августа 2011 г. Источником этих потоков, предположительно, явились вспышки и КВМ 2, 3 и 4 августа 2011 г. Более детальное рассмотрение эволюции ионного состояния Fe в плазме КВМ показало, что в плазме коронального выброса 2 августа 2011 г. при начальной температуре 7 – 9 МК при движении в короне с расстояния 0,1 солнечного радиуса до области замораживания ионы FeXIX рекомбинировали до FeXIII, что соответствовало среднему заряду в транзиентном потоке, вызвавшем магнитную бурю. Таким образом, это подтверждает, что источником бури 5 – 6 августа были именно вспышка и КВМ 2 августа 2011 г.

Соруководитель темы: В.А. Слемзин, slem@sci.lebedev.ru

### Публикации:

 Д. Г. Родькин, Ю. С. Шугай, В. А. Слемзин, И. С. Веселовский. Влияние солнечной активности на эволюцию параметров солнечного ветра в период роста 24го цикла. АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК, 2016, том 50, № 1, с. 1–11.

2. V. Slemzin, Yu. Shugay, F. Goryaev, P. Pagano, D. Rodkin, I. Veselovsky. Identification of coronal origins of geo-effective ICMEs by modeling of their ionic composition. Report to the ISEST2015 workshop, Mexico, 25 – 30 October 2015.

### Тема 2.3.2. Исследование межпланетных мерцаний.

Аннотация. На основании анализа данных мониторинга межпланетных мерцаний показано, что в период максимума солнечной активности глобальное распределение уровня мелкомасштабных флуктуаций плотности солнечного ветра в среднем близко к сферически симметричному.

### Содержание работы.

Проведена обработка наблюдений межпланетных мерцаний, выполненных в период максимума солнечной активности с апреля 2013 г. по апрель 2014 г. на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Круглосуточно регистрировались флуктуации потока радиоизлучения всех источников с мерцающим потоком более 0.2 Ян, попадающих в полоску неба шириной 50° по склонениям, соответствующую 96-лучевой диаграмме направленности радиотелескопа. Полное число источников, наблюдавшихся в течение суток, достигало 5 000. Обработка данных наблюдений проводилась в предположении, совокупность мерцающих источников представляет собой однородный что статистический ансамбль. Ежедневно строились двумерные карты распределения уровня мерцаний, анализ которых показывает сильную нестационарность и крупномасштабную неоднородность пространственного распределения параметров солнечного ветра. По картам распределения уровня мерцаний, усредненным по месячным интервалам, исследована глобальная структура распределения солнечного ветра в период максимума солнечной активности, которая оказалась в среднем близкой к сферически симметричной. Полученные данные показывают, что на сферически симметричном фоне наблюдается восточно-западная асимметрия, которая свидетельствует о присутствии в солнечном ветре крупномасштабных структур спирального типа.

### Публикации:

Chashei I.V., Shishov V.I., Tyul'bashev S.A., Subaev I.A., Oreshko V.V., Logvinenko S.V. Global structure of the turbulent solar wind during 24 solar activity maximum from IPS observations with the multi-beam radio telescope BSA LPI at 111 MHz // Solar Phys. V.290. No.9. P.2577-2587. 2015 DOI 10.1007/s11207-015-0703-2
 Чашей И.В., Шишов В.И., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в максимуме 24 цикла солнечной активности // Космич. Исслед. (принято к печати)

### Проект 2.4. Исследование явлений нестационарного взаимодействия солнечного ветра с околоземной ударной волной.

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

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

сценарий формирования исследуемого образования. Сценарий подлежит дальнейшему уточнению и дополнению дополнительными расчётами.



Рис. 1. Сверху вниз: диаграмма спектр-энергия отраженного пучка, диаграмма спектрэнергия солнечного ветра, концентрация отраженного пучка, концентрация солнечного ветра, скорость солнечного ветра, модуль магнитного поля.



Рис. 2. Спектры скоростей отраженного пучка по измерениям на спутнике C1 (слева) и C3 (права).



Рис. 3. Слева: модуль магнитного поля, концентрация отраженного печка, концентрация ионов в двух энергичных интервалов по скорости ионов. Справа: функция распределения ионов пучка в зависимости от времени (сверху вниз) и от скорости (максимальная скорость слева, минимальная скорость справа). Каждая панель содержит угловое распределение концентрации ионов по сфере: азимут по горизонтали, полярный угол – по вертикали).

Руководитель проекта: д.ф.-м.н. Вайсберг О.Л. Состав группы: Шестаков А.Ю. и Шувалов С.Д.

Сделан доклад на Cluster 15th and Double Star 10th anniversary workshopб October 2015.

Проект 2.5. Поиск механизмов ускорения солнечного ветра на основе материалов радиозондирования, полученных с использованием космических аппаратов в течение трех циклов солнечной активности

Аннотация. Альвеновские волны, генерируемые вблизи фотосферы и распространяющиеся в межпланетное пространство, предполагаются одним из главных механизмов нагревания солнечной короны и ускорения солнечного ветра. Прямые наблюдения этих волн на малых расстояниях от Солнца представляют большую трудность, т.к. наибольшее приближение космических аппаратов к Солнцу превышает 62 солнечных радиуса. Поэтому приобретают важное значение дистанционные методы

исследования внутренней короны и, в первую очередь, радиозондирование сигналами космических аппаратов. Наблюдения фарадеевского вращения плоскости поляризации сигналов радиоисточников вблизи их верхнего соединения дают информацию о магнитных полях солнечной короны для областей, недоступных для локальных методов исследований. Наиболее крупномасштабные эксперименты по радиозондированию солнечной короны линейно-поляризованными сигналами были выполнены с использованием солнечных зондов HELIOS-1 (1975-1984) и HELIOS-2 (1976-1980).

#### Описание экспериментов

Измерения угла поворота плоскости поляризации сигналов космических аппаратов производились с периодичностью 1, 10 и 20 секунд. Наземные станции, использовавшиеся для этой работы, включают радиотелескоп с диаметром 100 м Института радиоастрономии им. М. Планка вблизи Эффельсберга (называемый также DSS 69) и три станции американской сети слежения за космическими аппаратами, расположенными в Голдстоуне (Калифорния, США, DSS 14); вблизи Канберры (Австралия, DSS 43) и вблизи Мадрида (Испания, DSS 63). Во время проведения измерений с использованием зондов HELIOS-1 и HELIOS-2 диаметры этих наземных антенн составляли 64 м (к настоящему времени их размер увеличен до 70 м).

### Кросс-корреляционный анализ флуктуаций фарадеевского вращения

Записи флуктуаций фарадеевского вращения, в нескольких разнесенных на большое расстояние наземных станциях одновременно обеспечивают возможность исследования распространения альвеновских волн в солнечной короне. Было установлено, что, несмотря на большое расстояние между пунктами (более 1000 км), временные спектры флуктуаций фарадеевского вращения были подобны друг другу. Так как коэффициент кросскорреляции был достаточно велик, представлялось возможным определить радиальную компоненту скорости движения неоднородностей магнитного поля с высокой точностью. На рис. 1 представлена кросс-корреляционная функция  $K(\tau)$  и автокорреляционная функция A(t), полученные по наблюдениям в наземных пунктах Голдстоун и Канберра 22 декабря 1981 г. Малый временной сдвиг максимума ККФ  $\tau_m = -3$  с свидетельствует о высокой скорости движения неоднородностей V = 623 км/с.



Рис. 1. Кросс-корреляционная (сплошная кривая) и автокорреляционная (пунктир) функции флуктуаций фарадеевского вращения, зарегистрированные 22 декабря 1981 в наземных пунктах Голдстоун и Канберра.

Подобный случай представлен на рис. 2 для измерения фарадеевского вращения в тех же наземных пунктах 9 января 1983 г. Измеренная скорость снова приблизительно равна скорости альвеновских волн V = 420 км/с.



Рис. 2. Кросс-корреляционная (сплошная кривая) и автокорреляционная (пунктир) функции флуктуаций фарадеевского вращения, зарегистрированные 9 января 1983 в наземных пунктах Голдстоун и Канберра.

Результаты кросс-корреляционной обработки всех данных, полученных в течение четырех часов сеанса радиозондирования, выполненного 9 января 1983 г., представлены на рис. 3. Прицельное расстояние радиолуча в этом сеансе изменялось в пределах от 3.74 до 4.50 солнечных радиусов. Рис. За дает средние значения интенсивности флуктуаций

фарадеевского вращения плоскости поляризации  $\sigma_F$ . Можно считать, что имеется тенденция к уменьшению уровня флуктуаций фарадеевского вращения  $\sigma_F$  при увеличении радиального расстояния. Рис. 3b дает соответствующие значения измеренной при кросскорреляционном анализе скорости, которая в этом случае совпадает с альвеновской скоростью.

Типичные значения скорости альвеновских волн на расстояниях  $R = (3.7...4.5) R_S$  составляют  $N_A = (300...400)$  км/с.



Рис. 3. Интенсивность флуктуаций фарадеевского вращения <σ<sub>F</sub>> (a) и скорость движения неоднородностей магнитного поля V (b).

### Спектральный анализ флуктуаций фарадеевского вращения

Примеры двух спектров представлены на рисунках 4a и 4b. Эти спектры были определены по данным измерений, выполненных 17 июля 1976 г. ( $R = 3.1 R_S$ ) и 21 декабря 1981 г. ( $R = 3.0 R_S$ ) соответственно, т.е. в периоды с сильно отличающимися уровнями солнечной активности. В первом случае число солнечных пятен |W| было очень низким (W=14), а во втором случае уровень солнечной активности был близким к максимуму (W=150). Временные спектры, представленные на рис. 4, могут быть описаны степенными

Временные спектры, представленные на рис. 4, могут быть описаны степенными функциями

$$G_F(v) = G_{0F} v^{-\alpha_F}$$

для всех флуктуационных частот v в интервале  $v_{\ell} < v < v_u$ , где  $v_{\ell}$  и  $v_u$  представляют собой нижнюю и верхнюю границы частотного интервала, содержащего флуктуации, создаваемые плазмой;  $\alpha_F$  – спектральный индекс временных спектров флуктуаций фарадеевского вращения.



Рис. 4. Временные спектры, полученные по измерениям фарадеевского вращения в наземном пункте Эффельсберг 17 июля 1976 г.  $R = 3.1 R_S$  (а) и наземном пункте Мадрид 21 декабря 1981 г.  $R = 3.0 R_S$  (b)

Радиальная зависимость спектрального индекса α<sub>F</sub> представлена на рис. 5. Эта зависимость включает измерения за 1979, 1981 и 1983 годы.



Рис. 5. Радиальная зависимость спектрального индекса α<sub>F</sub> временных спектров флуктуаций фарадеевского вращения.

Представленные на рис. 5 зависимости предполагают, что спектральный индекс  $\alpha_F$  изменяется от 2.0 до 2.4 на малых гелиоцентрических расстояниях (2...3)R<sub>s</sub>, которые соответствуют спектральному индексу трехмерного спектра турбулентности p = 3.0...4.4. Наблюдается тенденция к уменьшению спектрального индекса  $\alpha_F$  с увеличением радиального расстояния R.

В ряде случаев временные спектры флуктуаций фарадеевского вращения демонстрируют присутствие квазипериодических компонент, которые проявляют широкий набор периодов, начиная от T ≈ 4 минут, и простирающихся до 160 минут.

Рис. 6 показывает два фрагмента измерений фарадеевского вращения большой длительности (~7 часов) в период низкой солнечной активности 22 мая 1976 г. (рис. 6а) зарегистрированные на прицельных расстояниях между 5.0 и 5.17 радиусами Солнца  $R_s$  (фаза захода) и в период высокой активности 24/25 октября 1979 г. (рис. 6b) для прицельных расстояний от 3.73 до 3.25  $R_s$  (фаза выхода).

Эти два примера могут быть интерпретированы как квазипериодические вариации фарадеевского вращения с довольно большими периодами, составляющими  $<T_1> = (161\pm11)$  мин. и  $<T_2> = (163\pm4)$  мин., соответственно.



Рис. 6. Крупномасштабные квазипериодические вариации фарадеевского вращения 160 минутного периода, наблюдавшиеся в период минимума (а) и максимума (b) солнечной активности.

### Основные результаты

Корреляционный и спектральный анализ флуктуаций фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволн при распространении их в солнечной короне был выполнен на основе данных, полученных при реализации миссий HELIOS-1 и HELIOS-2.

Кросс-корреляционная обработка материалов одновременных наблюдений флуктуаций фарадеевского вращения в нескольких разнесенных на большое расстояние наземных пунктах были использованы для определения скорости движения альвеновских волн для гелиоцентрических расстояний между 3 и 6 радиусами Солнца R<sub>S</sub>. Найденные значения скоростей изменяются в пределах от 250 до 650 км/с и всегда превышают локальную скорость солнечного ветра. Это свидетельствует о том, что более существенный по сравнению с электронной концентрацией плазмы вклад в флуктуации фарадеевского вращения вносят флуктуации магнитного поля (альвеновские волны).

Было установлено, что измерения фарадеевского вращения, зарегистрированные при проведении экспериментов радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами зондов HELIOS-1 и HELIOS-2, демонстрируют присутствие волновых структур с периодами, изменяющимися в пределах от 2.5 до 160 минут. Наиболее частыми являются периоды вблизи 5, 20, 30 и 6 минут, которые могут рассматриваться как гармоники наиболее длинного периода флуктуаций, составляющего 160 минут.

Установлено, что амплитуда квазипериодических осцилляций, как правило, является более высокой для больших периодов вариаций.

Руководитель проекта: Ефимов Анатолий Иванович, к.т.н., зав. лаб.

E-mail: <u>efimov@ms.ire.rssi.ru</u> ).

Состав группы: Самознаев Л.Н., к.ф.-м.н., вед.н.с.; Андреев В.Е., к.ф.-м.н., ст.н.с.; Рогашкова А.И., д.ф.-м.н., вед.н.с.; Рудаш В.К., к.ф.-м.н., ст.н.с.; Луканина Л.А., ст.н.с.; Копнина Т.Ф., вед.электроник; Курилова И.В., вед. инженер; Светлицкая О.Э., вед. инженер.

### Публикации:

1. Ефимов А.И., Луканина Л.А., Рогашкова А.И., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Флуктуации фарадеевского вращения по данным поляризационного радиопросвечивания околосолнечной плазмы сигналами космических зондов HELIOS-1,-2 // Астрономический журнал. 2015. Т. 92. № 4. С. 350-364. [Astronomy Reports. 2015. V. 59. № 4. Р. 313-326]. DOI: 10.7868/S0004629915040027

2. Ефимов А.И., Луканина Л.А., Рогашкова А.И., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Bird M.K., Pätzold M. Coronal Radio Occultation Experiments with the *Helios* Solar Probes:

Correlation/Spectral Analysis of Faraday Rotation Fluctuations // Solar Physics. 2015. V. 290. № 9. P. 2397-2408

### http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11207-015-0687-y

3. Ефимов А.И., Луканина Л.А., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Наблюдения коротирующих структур солнечного ветра при радиозондировании сигналами космических аппаратов *ROSETTA* и *MARS EXPRESS* // КИ. 2016. Т. 54 (в печати).

# Проект 2.6. Исследование пространственного и энергетического распределения межзвездного водорода в солнечном ветре.

Аннотация. Показано, что распределение межзвездных атомов водорода на границе гелиосферы (в водородной стенке) влияет на характеристики рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения, измеряемого внутри гелиосферы.

Наиболее характерной особенностью распределения межзвездных атомов водорода во внешней гелиосфере является так называемая водородная стенка. Это увеличение концентрации атомов снаружи гелиопаузы (контактной поверхности, отделяющей плазму солнечного ветра от заряженной компоненты межзвездной среды), вызванное эффективной перезарядкой межзвездных атомов на заторможенных в этой области межзвездных протонах. В результате перезарядки рождаются вторичные атомы водорода, которые имеют меньшие скорости по сравнению с первичными и, следовательно, накапливаются, образуя водородную стенку. Это явление было впервые предсказано в работе Baranov et al. (1991), а затем подтверждено экспериментально в работе Linsky & Wood (1996).



Рис. 1. А. С – примеры водородных стенок (концентрация вторичных атомов водорода вдоль луча зрения в носовой части гелиосферы в зависимости от расстояния). В, D – соответствующие значения отношения интенсивностей рассеянного Лайман-альфа излучения, полученные в моделях с заданной водородной стенкой. Красные кривые показывают результаты измерений на Вояджере-1. В рамках данного проекта мы исследовали возможные способы удаленной диагностики водородной стенки с помощью измерений рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в гелиосфере. Дело в том, что Лайман-альфа фотоны, рассеянные в водородной стенке, имеют значительный допплеровский сдвиг относительно средней скорости атомов водорода внутри гелиосферы, поскольку рассеивающие атомы в водородной стенке имеют скорость, близкую к нулю. Поэтому фотоны из водородной стенки в меньшей степени поглощаются в гелиосфере и могут быть зафиксированы при измерениях внутри гелиосферы (на достаточном удалении от Солнца). Исследование показало, что только по интенсивности рассеянного излучения в носовой части гелиосферы диагностировать наличие и высоту водородной стенки не представляется возможным, поскольку вклад излучения от стенки мал по сравнению с излучением, рассеянным внутри гелиосферы. Однако отношение интенсивностей в хвостовой и носовой частях гелиосферы оказывается чувствительно к высоте и положению водородной стенки.

На рис. 1 показаны примеры нескольких водородных стенок, которые отличаются по высоте (рис. А) и положению (рис. С), а также соответствующие им отношения интенсивностей Лайман-альфа излучения, измеряемого в хвостовой и носовой частях гелиосферы (рис. В и D). Расчеты проводились в рамках численной модели гелиосферного ударного слоя вдоль траектории аппарата Вояджер-1 в период 1993-2003 гг., когда он находился на расстояниях 50-90 а.е. от Солнца. Видно, что увеличение высоты водородной стенки, а также ее приближение к Солнцу приводит к уменьшению отношения интенсивностей. Причем рассмотренная нами модель границы гелиосферы (ее результаты показаны сплошными черными кривыми на рис. 1 А-В) предсказывает большее отношение, чем это следует из измерений на Вояджере-1. Следовательно, для объяснения данных Вояджера нам необходима более высокая и/или более близкая к Солнцу водородная стенка. Этого можно добиться путем изменения параметров локальной межзвездной среды (ЛМС). А именно, высота и положение водородной стенки в модели определяются, прежде всего, концентрацией атомов водорода и протонов в ЛМС. Чем больше протонов и атомов, тем больше будет происходить перезарядок, и тем больше родится вторичных межзвездных атомов, из которых состоит водородная стенка. Также чем больше динамическое давление межзвездного ветра, тем ближе будет гелиопауза и, соответственно, водородная стенка к Солнцу. Однако параметры ЛМС не являются абсолютно свободными параметрами модели, поскольку есть много других ограничений, связанных с различными данными измерений. В дальнейшем планируется провести параметрическое исследование и выяснить, возможно ли выбрать параметры

ЛМС так, чтобы они позволяли объяснить данные Вояджера по интенсивностям Лайманальфа излучения, а также не противоречили другим данным.

### Руководитель проекта:

Измоденов Владислав Валерьевич, ИКИ РАН, <u>izmod@iki.rssi.ru</u> Состав группы: Алексашов Дмитрий Борисович, ИКИ РАН, Катушкина Ольга Александровна, ИКИ РАН, Рудерман Михаил Соломонович, ИКИ РАН, Голиков Евгений Александрович, ИКИ РАН, Балюкин Игорь Игоревич, ИКИ РАН.

### Публикации:

1. Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Three-dimensional Kinetic-MHD Model of the Global Heliosphere with the Heliopause-surface Fitting, Astrophys. J. Suppl. Ser., V. 220, No. 2, id 32, 2015

2. Katushkina O. A., V. V. Izmodenov, D. B. Alexashov, N. A. Schwadron, and D. J. McComas, Interstellar hydrogen fluxes measured by IBEX-Lo in 2009: numerical modeling and comparison with the data, Astrophys. J. Suppl. Ser., V. 220, No. 2, id 33, 2015.

3. Katushkina O.A., Quemerais E., Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Sandel B.R., Remote diagnostic of the hydrogen wall through measurements of the backscattered solar Lyman-alpha radiation by Voyager-1/UVS in 1993-2003, JGR, submitted, 2015.

### Проект 2.7. Новые методы и технологии построения изображений Солнца со

### сверхвысоким пространственным разрешением в ходе космических экспериментов.

**Тема 2.7.1. Аннотация.** Получены данные о корреляции между мерой эмиссии и температурой горячей компоненты солнечных микровспышек и характеристиками фотосферного магнитного поля во вспышечной области. Ранее соответствующая информация была получена только для вспышек большей мощности. Показано, что зависимость интенсивности излучения вспышек от потока магнитного поля имеет степенной характер. Наклон спектра в области вспышек малых энергий в целом совпадает с наклоном спектра в области крупных вспышек. Указанный результат дает аргументы в пользу точки зрения, что вспышки малых и крупных рентгеновских классов образуются одним механизмом.



Зависимость рентгеновского излучения солнечных вспышек от потока магнитного поля активной области. Данные измерений ФИАН (красные) представлены на фоне ранее известных значений (черные элементы).

### Публикация:

A.S.Kirichenko, S.A.Bogachev, "Influence of the magnetic field strength on the intensity of X-ray emission of solar microflares". Solar Physics, в печати.

**Тема 2.7.2. Аннотация.** Впервые в короне Солнца обнаружены петлеобразные структуры (аркады) с температурой более 5 млн. К. Ранее плазма такой температуры регистрировалась на Солнце только в виде отдельных источников излучения, расположенных вблизи вершин вспышечных магнитных петель. Наблюдения были проведены прибором ФИАН MISH (монохроматический спектрогелиометр, работавший на линии Mg XII 8.42 A), установленном на российском спутнике КОРОНАС-Фотон. Предложено теоретическое объяснение.



Система из трех петлеобразных плазменных структур с температурой выше 5 млн. К (вид сверху). Изображение получено прибором MISH (ФИАН; космический аппарат КОРОНАС-Фотон) в линии MgXII 8.42 A.

### Публикация:

A.Reva, S.Shestov, I.Zimovets, S.Bogachev, S. Kuzin, "Wave-like Formation of Hot Loop Arcades", Solar Physics, Online First, 10/2015 (DOI: 10.1007/s11207-015-0769-x)

**Тема 2.7.3. Аннотация.** Разработана методика контроля летной системы юстировки зеркал для космических солнечных телескопов высокой точности. Система юстировки зеркал предназначена для решения двух основных задач: наведения оси визирования инструмента на интересующий участок солнечной короны в пределах ±30' без переориентации спутника или телескопа и внутренняя стабилизация оптической системы для получения изображений с сверхвысоким разрешением (до 0.1") во время длительной

экспозиции при наличии внешних воздействий от КА. Контроль за юстировкой телескопа, а также ее автоматическая подстройка в космосе в процессе эксплуатации осуществляется с помощью «малого зеркала», установленного на платформе, управляемой тремя пьезоактуаторами. С их помощью осуществляется прецизионная угловая юстировка зеркала в пределах 30 угловых секунд. Для изучения основных механических характеристик платформы, таких как зависимость угла наклона от напряжения на пьезо-актуаторах, гистерезис и влияние условий работы и хранения на них, необходим измерительный прибор, обеспечивающий в идеале точность измерений на порядок выше требуемого углового разрешения. для измерения сверхмалых угловых перемещений.

Для исследования свойств платформы была использована методика с применением интерферометрии с дифракционной волной сравнения на основе одномодовых оптических волокон с суб-волновой выходной апертурой. Эксперименты показали, что точность измерений составила около 0.01 угловой секунды в указанном диапазоне угловых перемещений.



Схема эксперимента. FM – плоское зеркало, SWS – источник сферической волны,

ССD-цифровая камера, to PC – к персональному компьютеру, F – одномодовое оптическое волокно, L – лазер с системой заводки излучения в волокно, A – усилитель напряжения на пьезо-актуатор, SM – сферическое зеркало, TP – исследуемая платформа

### Публикация:

D. A. Gavrilin, S. V. Kuzin, N. N. Salashchenko, M. V. Svechnikov, M. N. Toropov, N. I. Chkhalo, and A. A. Soloviev, "Application of point diffraction interferometry for measuring angular displacement to a sensitivity of 0.01 arcsec", Applied Optics, Vol. 54, No. 31, 2015, pp. 9315-9319

Руководители проекта: Кузин С.В., Богачёв С.А. (ФИАН).

# Проект 2.8. Теория, экспериментальные исследования и численное моделирование магнитогидродинамической турбулентности в солнечном ветре и образование ударных волн в астрофизических объектах»

Аннотация. Разработана теория и численные методы моделирования, лабораторные методы получения ударной волны Тейлора и стационарной ударной волны с интенсивностью ~ 1 кбар в слое воды толщиной 1 мм. Волна Тейлора создается при помощи короткого (10 нс) импульса лазерного излучения с энергией 0.35 Дж, стационарная ударная волна создается в исследуемом слое ударником, летящим со скоростью ~100 м/с. Разработана расчетная модель методов получения ударных волн в слое воды.

Теория турбулентности в бесстолкновительной плазме является в настоящее время одной из выдающихся нерешенных проблем в физике космической плазмы. В отсутствие столкновительной вязкости динамика вихрей на малых масштабах является кинетической по природе и должна быть описана кинетической теорией плазмы. Определение физического механизма потока энергии по спектру и затухание турбулентности в вязком интервале, которая "заменяет" рассеяние в бесстолкновительной плазме солнечного ветра и устанавливает связь между макро– и микроскопическими параметрами даст возможность изучения турбулентного нагрева в космической плазме. Эта проблема находится еще в начальном состоянии. Кинетическая теория плазмы ограничена, главным образом, линейной теорией, однако, быстрое развитие суперкомпьютеров и методов численного моделирования дает в настоящее время возможность использования кинетических кодов Эйлера в бесстолкновительной плазме, в которой решаются уравнения Власова-Максвелла в многомерном фазовом пространстве. Вихревая структура турбулентности в энергетическом и инерционном интервалах сходна с турбулентностью жидкости, за существенным исключением того, что в газе или жидкости нарушения максвелловского распределения по скоростям не происходит, а в плазме при генерации электрических полей (магнитное поле не изменяет энергии заряженных частиц, но определяет вихревую структуру полей) происходит нагрев электронов и нарушение распределения частиц по скоростям. Поэтому существенное усложнение проблемы плазменной турбулентности состоит в необходимости решения проблем в 6D (3D в реальном пространстве и 3D в пространстве скоростей), что даже при существенном технологическом развитии достаточно быстро развиваемых солверов ограничивает решение проблем плазменной турбулентности. Использование почти «бесшумовых» кодов имеет решающее значение и впервые позволяет возможность анализа кинетических нелинейных эффектов, таких, как нелинейная эволюция функции распределения частиц, нелинейное насыщение затухания Ландау, и т.д. Конечно, быстрее численного способа, решить проблему рассеяния в бесстолкновительной плазме может использование промежуточных гирокинетических подходов, основанных на гиротропии и сильных предположениях анизотропии k -  $k \perp$ . Одной из гипотез является то, что ионно-звуковые волноподобные структуры, обнаруженные Гелиосом далеко от Земли, получают энергию от нестабильного потока тепла электронов или протонов образуемой ударной волной в солнечном ветре. Измерения (Марш, 2006) показали наличие сильной связи между электростатическим пиком и нетепловыми особенностями функции распределения частиц по скоростям, что приводит к анизотропии температуры и генерации ускоренных пучков.

### Формулировка теории МГД турбулентности в альфеновских скоростях.

Настоящее приближение имеет некоторые аналогии с переменными Эльзассера в теории МГД-турбулентности. Для симметрии гидродинамики и магнитного поля рассмотрим поведение плазмы во внешнем и индуцированном магнитном полях  $\mathbf{H} + \mathbf{h}$  которое справедливо при малых магнитных числах Рейнолдса  $Re_m \square 1$ , при этом альфеновские скорости определяются как

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{H}}{\sqrt{4\pi\rho}}, \ \mathbf{a}' = \frac{\mathbf{h}'}{\sqrt{4\pi\rho}}.$$

Уравнение движения может быть записано в виде

$$\rho \frac{dV_i}{dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ik}^S}{\partial x_k} + \frac{\partial \sigma_{ik}^R}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_k} T_{ik}^S + \frac{\partial}{\partial x_k} T_{ik}^R,$$

Где  $\sigma_{ik}^{R}$  — напряжение Стокса,  $\sigma_{ik}^{R}$  — напряжение Рейнолдса,  $T_{ik}^{S}$  — тензор максвелловских напряжений,  $T_{ik}^{R}$  — максвелловский тензор напряжений аналогичный рейнолдсовскому.

Уравнение для магнитного поля

$$\frac{\partial \mathbf{H}_{fot}}{\partial t} = \boldsymbol{\nu}_m \Delta \mathbf{H}_{fot} + \overline{\boldsymbol{\nu}} \times \mathbf{v} \times \mathbf{H}_{fot} \,.$$

Используя процедуру осреднения  $\mathbf{v} = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$ ,  $\mathbf{H}_{fot} = \mathbf{H} + \mathbf{h}'$ и обозначая после осреднения магнитное поле  $\mathbf{H} \equiv \langle \mathbf{H} \rangle$ , скорость  $\langle \mathbf{v} \rangle \equiv \mathbf{V}$ , и поле пульсаций магнитного поля  $\mathbf{h}'$ :

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = v_m \Delta \mathbf{H} + \nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{H} + \nabla \times \langle v \times h' \rangle$$

$$\frac{\partial \mathbf{h}'}{\partial \tau} = v_m \Delta \mathbf{h}' + \nabla \times \mathbf{v}' \times \overline{H} + \nabla \times \mathbf{V} \times h' + \nabla \times \mathbf{v}' \times \overline{h}' - \nabla \times \langle v' \times h' \rangle$$

ИЛИ

$$\frac{\partial h'_i}{\partial t} = v_m \Delta h'_i + H_k \frac{\partial v'_i}{\partial x_k} - v'_k \frac{\partial H_i}{\partial x_k} + h'_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} - V_k \frac{\partial h'_i}{\partial x_k} + h'_k \frac{\partial v'_i}{\partial x_k} - v'_k \frac{\partial h'_i}{\partial x_k}.$$

Используя определения пульсаций магнитного поля, получаем уравнения

$$\frac{\partial a'_{i}}{\partial t} + V_{k} \frac{\partial a'_{i}}{\partial x_{k}} - A_{k} \frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}} = -v'_{k} \frac{\partial A_{i}}{\partial x_{k}} + a'_{k} \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + v_{m}V_{k} \frac{\partial^{2} a'_{i}}{\partial x_{k} \partial x_{k}} + a'_{k} \frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}} - v'_{k} \frac{\partial a'_{i}}{\partial x_{k}} - \left\{ \left\langle a'_{k} \frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}} \right\rangle - \left\langle v'_{k} \frac{\partial a'_{i}}{\partial x_{k}} \right\rangle \right\}$$

$$\frac{\partial a'_{j}}{\partial t} + V_{k} \frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}} - A_{k} \frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}} = -v'_{k} \frac{\partial A_{j}}{\partial x_{k}} + a'_{k} \frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}} + v_{m}V_{k} \frac{\partial^{2} a'_{j}}{\partial x_{k} \partial x_{k}} + a'_{k} \frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}} - v'_{k} \frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}} - \left\{ \left\langle a'_{k} \frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}} \right\rangle - \left\langle v'_{k} \frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}} \right\rangle \right\}$$

$$\frac{\partial a'_{j}}{\partial t} + V_{k} \frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}} - A_{k} \frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left( v'_{i}v'_{k} - \langle v'_{i}v'_{k} \rangle \right) = -\frac{\partial \rho'}{\partial x_{k}} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} v \left( \frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}} + \frac{\partial v'_{k}}{\partial x_{k}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left( a'_{k}A_{k} + A_{i}a'_{k} + a'_{i}a'_{k} - \langle a'_{i}a'_{k} \rangle \right)$$

$$\frac{\partial v'_{j}}{\partial t} + V_{k} \frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}} + v'_{k} \frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left( v'_{i}v'_{k} - \langle v'_{i}v'_{k} \rangle \right) = -\frac{\partial \rho'}{\partial x_{j}} + \frac{\partial}{\partial x_{k}} v \left( \frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}} + \frac{\partial v'_{k}}{\partial x_{i}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{k}} \left( a'_{i}A_{k} + A_{i}a'_{k} + a'_{i}a'_{k} - \langle a'_{i}a'_{k} \rangle \right)$$

Умножая уравнения на  $a'_j$ ,  $a'_i$ ,  $v'_j$ ,  $v'_i$ , суммируя и осредняя, получим уравнения для вторых моментов  $B_{ij} = \langle a'_i a'_j \rangle$ ,  $M_{ij} = \langle v'_i v'_j \rangle$ 

$$\frac{\partial B_{ij}}{\partial t} + V_k \frac{\partial B_{ij}}{\partial x_k} = A_k \left( \left\langle a'_j \frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \right\rangle + \left\langle a'_i \frac{\partial v'_j}{\partial x_k} \right\rangle \right) - \left\langle a'_j v'_k \right\rangle - \left\langle a'_i v'_k \right\rangle - \left\langle a$$

$$+ < a'_{j}a'_{k} > \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + < a'_{i}a'_{k} > \frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}} + v_{m}\left(\left\langle a'_{j}\frac{\partial^{2}a'_{i}}{\partial x_{k}\partial x_{k}}\right\rangle + \left\langle a'_{i}\frac{\partial^{2}a'_{j}}{\partial x_{k}\partial x_{k}}\right\rangle\right)$$

Второй член в правой части можно записать в виде

$$v_m(\ldots) = \frac{\partial}{\partial x_k} v_m\left(\left\langle a'_j \frac{\partial a'_i}{\partial x_k} \right\rangle + \left\langle a'_i \frac{\partial a'_j}{\partial x_k} \right\rangle\right) - 2v_m\left\langle \frac{\partial a'_i}{\partial x_k} \frac{\partial a'_j}{\partial x_k} \right\rangle = v_m \Delta B_{ij} - 2\varepsilon_{ij}^B,$$

Где диссипация магнитного поля

$$\varepsilon_{ij}^{B} = V_{m} \left\langle \frac{\partial a'_{i}}{\partial x_{k}} \frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}} \right\rangle.$$

Для пульсаций скоростей получим уравнения tRST (Reynolds Stress Transport)

$$\frac{dM_{ij}}{dt} = \sigma_{jk}^{R} \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + \sigma_{ik}^{R} \frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}} - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{i} \rangle \delta_{jk} + M_{ijk} \Big) - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{j} \rangle \Big) \Big|_{t=0}$$

$$-\nu\left(\left\langle v'_{j}\frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}}\right\rangle + \left\langle v'_{i}\frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}}\right\rangle\right) - 2\varepsilon_{ij} + A_{k}\left(\left\langle v'_{j}\frac{\partial a'_{i}}{\partial x_{k}}\right\rangle + \left\langle v'_{i}\frac{\partial a'_{j}}{\partial x_{k}}\right\rangle\right) +$$

$$+ < v'_{j}a'_{k} > \frac{\partial A_{i}}{\partial x_{k}} + \left\langle v'_{j}\frac{\partial}{\partial x_{k}}a'_{i}a'_{k} \right\rangle + \left\langle v'_{i}\frac{\partial}{\partial x_{k}}a'_{j}a'_{k} \right\rangle,$$

Где  $M_{ij} = \langle v'_i v'_j \rangle = -\sigma_{ik}^R$  — вторые моменты. Обозначим  $R_{ij} = \langle v'_i a'_j \rangle$ , тогда получим следующую систему уравнений:

$$\frac{dM_{ij}}{dt} = \sigma_{jk}^{R} \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + \sigma_{ik}^{R} \frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}} - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{i} \rangle \delta_{jk} + M_{ijk} \Big) + \nu \Delta M_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{j} \rangle - \delta_{jk} + M_{ijk} \Big) + \nu \Delta M_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle - \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{j} \rangle - \delta_{jk} + M_{ijk} \Big) + \nu \Delta M_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big( \langle \rho' \nu'_{j} \rangle - \delta_{ik} + \langle \rho' \nu'_{j} \rangle - \delta_{ik$$

$$-2\varepsilon_{ij} + A_k \left( \left\langle v'_j \frac{\partial a'_i}{\partial x_k} \right\rangle + \left\langle v'_i \frac{\partial a'_j}{\partial x_k} \right\rangle \right) + R_{ik} \frac{\partial A_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial A_i}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial A_i}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial A_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial A_$$

$$+\left(\left\langle v'_{j}\frac{\partial}{\partial x_{k}}a'_{i}a'_{k}\right\rangle + \left\langle v'_{i}\frac{\partial}{\partial x_{k}}a'_{j}a'_{k}\right\rangle\right); \left(\frac{dM_{ij}}{dt}\right)_{mech} = \dots$$

$$\frac{dB_{ij}}{dt} = A_k \left( \left\langle a'_i \frac{\partial v'_j}{\partial x_k} \right\rangle + \left\langle a'_j \frac{\partial v'_i}{\partial x_k} \right\rangle \right) - \left( R_{kj} \frac{\partial A_i}{\partial x_k} + R_{ki} \frac{\partial A_j}{\partial x_k} \right) + B_{jk} \frac{\partial V_i}{\partial x_k} + B_{ik} \frac{\partial V_j}{\partial x_k} + B$$

$$+\left\langle a'_{j}a'_{k}\frac{\partial v'_{i}}{\partial x_{k}}\right\rangle+\left\langle a'_{i}a'_{k}\frac{\partial v'_{j}}{\partial x_{k}}\right\rangle-\frac{\partial}{\partial x_{k}}<\nu'_{k}a'_{i}a'_{j}>+\nu_{m}\Delta B_{ij}-2\varepsilon_{ij}^{B}$$

В МГД турбулентности кинетическая энергия состоит из кинетической энергии частиц и поля

$$R = \frac{1}{2} < v^{\prime 2} > + \frac{< h^{\prime 2} >}{8\pi\rho} = \frac{< v^{\prime 2}}{2} + \frac{< a^{\prime 2}}{2}.$$

По этой причине имеет смысл найти уравнения для  $M_{ij} + B_{ij}$ :

$$\frac{d}{dt}(M_{ij} + B_{ij}) = -M_{ik}\frac{\partial V_j}{\partial x_k} - M_{ik}\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + B_{ik}\frac{\partial V_j}{\partial x_k} + B_{jk}\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + B_{jk}\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + B_{jk}\frac{\partial V_j}{\partial x_k} +$$

$$+\nu\Delta M_{ij} - 2\varepsilon_{ij} + \nu_m\Delta B_{ij} - 2\varepsilon_{ij}^B + \left(R_{jk} - R_{kj}\right)\frac{\partial A_i}{\partial x_k} + \left(R_{ik} - R_{ki}\right)\frac{\partial A_j i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} + \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} + \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} + \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} - \frac{\partial A_j i}{\partial x_k} -$$

$$\frac{\partial}{\partial x_{k}} \Big\{ < p'v'_{j} > \delta_{ik} + < p'v'_{i} > \delta_{jk} + M_{ijk} - A_{k} \Big( R_{ji} - R_{ij} \Big) - \Big( < v'_{j}a'_{i}a'_{k} > + < v'_{i}a'_{j}a'k > - < v'_{k}a'_{i}a'_{j} > \Big) \Big\}$$

Или в стандартных обозначениях

$$\frac{d(B)_{ij}}{dt} = P_{ij}^{tot} - \frac{\partial q_{ijk}^{tot}}{\partial x_k} - 2\varepsilon_{ij}^B + \nu \Delta M_{ij} + \nu_m \Delta B_{ij} \quad (e)$$

Где общие производство турбулентности и потоки равны

$$-M_{ik}\frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}}-M_{jk}\frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}}+B_{ik}\frac{\partial V_{j}}{\partial x_{k}}+B_{jk}\frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}}+\left(R_{jk}-R_{kj}\right)\frac{\partial A_{i}}{\partial x_{k}}+\left(R_{ik}-R_{ki}\right)\frac{\partial A_{j}}{\partial x_{k}}$$

Вследствие линейного характера МГД уравнений они не содержат членов типа  $B_{ik} \frac{dA_j}{\partial x_k}$ , т.е. гидродинамическая и МГД-турбулентности не разделяются

$$q_{ijk}^{iot} = \langle p'_{\nu'j} \rangle \delta_{ik} + \langle p'_{\nu'i} \rangle \delta_{jk} + M_{ijk} - A_k \left( R_{ji} - R_{ij} \right) - \left( \langle \nu'_j a'_i a'_k \rangle + \langle \nu'_i a'_j a'_k \rangle + \langle \nu'_k a'_i a'_j \rangle \right)$$

Из уравнения (e) полагая *i* = *j* и деля на 2 находим уравнения для кинетической и электромагнитной энергий:

$$\frac{dK}{dt} = \sigma_{ik}^{R} \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + B_{ik} \frac{\partial V_{i}}{\partial x_{k}} + R_{\Delta} + \Delta K + v_{m} \Delta K_{M} - \varepsilon - \varepsilon^{B},$$

Где

$$R_{\Delta} = \left(R_{ik} - R_{ki}\right) \frac{\partial A_i}{\partial x_k}$$

Полученные уравнения представляют формулировку проблемы МГД-турбулентности, которая будет решаться на следующих этапах.

Кроме того, будут рассмотрены следующие задачи:

- RANS-LES-DNS моделирование МГД турбулентности;
- Ионно-звуковая МГД-турбуленость;
- Моделирование турбулентности в расширяющемся солнечном ветре;
- Численное моделирование анизотропной турбулентности;
- Бесстолкновительная турбулентность и аналогии и противоречия с гидродинамической турбулентностью.

### Краткая формулировка основного достижения

Получены уравнения и поставлены задачи МГД-турбулентности в формализме Эльзассера и получены моментные уравнения, позволяющие моделировать турбулентность солнечного ветра и другие задачи планетной астрофизики, разработаны программы моментного и прямого численного моделирования МГД-турбулентности.

### Руководитель проекта:

Сон Эдуард Евгеньевич, д.ф.-м.н., член-корр. РАН, son.eduard@gmail.com Состав группы: Сон Эдуард Евгеньевич, Долуденко Алексей Николаевич, Куликов Юрий Матвеевич, Сон Константин Эдуардович.

#### Название организации:

Объединенный институт высоких температур РАН

### Публикации:

1. SonE., SonK. RANS – LAS – DNS models of MHD turbulence fogigh Magnetic Reynolds Numbers. EPL, in press.

 Gadzhiev M. Kh., Kulikov Y.M., Panov V.A., Son E.E., and Tyuftyaev A.S.Supersonic Plasmatron Nozzle Profiling with the Real Properties of High Temperature Working Gas1. ISSN 0018\_151X, High Temperature DOI: 10.1134/S0018151X15060073/ Vasilyak L.M., PecherkinV.Ya., Vetchinin S.P., Panov V.A., Son E.E., Efimov B.V., Danilin A.N., Kolobov V.V., Selivanov V.N.and Ivonin V.V. Electrical breakdown of soil under nonlinear pulsed current spreading. IOP Publishing. J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 285201 (7pp)DOI:10.1088/0022-3727/48/28/285201.

4. Son E.E., Dyrenkov A.V., Kyung O., Son K.E., and VelikodnyV.Yu. Shock Wave in a Gas\_liquid Bubble Medium. ISSN 0018\_151X, High Temperature.

DOI:10.1134/S0018151X1506019X

5. Smirnov B.M. and Son E.E. Generation of Metal Nanoclusters and Microparticles. ISSN 0018\_151X, High Temperature, 2015, Vol. 53, No. 5, pp. 743–751.

DOI:10.1134/S0018151X15050259

6. Фортов В.Е., Смирнов В.П., Сон Э.Е., Быков Ю.А., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Олейник Г.М., Савельев А.С. Экспериментальное моделирование удара молнии в грунт. Теплофизика высоких температур, 2015, том 53, № 6, с. 1–5. DOI:10.7868/s004036441506006x

7. Глушнева А.В., Савельев А.С., Сон Э.Е., Терешонок Д.В. Исследование влияния параметров разряда на распространение ударной волны из канала разрядной камеры // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 3. с.153-155.

### Доклады на конференциях

Семинар по аэромеханике (22 ноября 2015 г.)

ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГТУ– НИИ мех МГУ – ОИВТРАН

Зеленый Л.М., Горшков О.А., Кабов О.А., Карабаджак Г.Ф., <u>Сон Э.Е.</u>, Фортов В.Е.Цурков В.И.

ОИВТ РАН, ИКИ РАН, ИТ СО РАН, ВЦ РАН, ЦНИИМАШ, МФТИ

Проект 2.9. Средние физические характеристики пятен в изменениях солнечной активности

### Тема 2.9.1. Две популяции солнечных пятен и солнечное динамо.

Аннотация. Показано, что по своим физическим характеристикам (распределению площадей, времени жизни, дифференциальному вращению) группы солнечных пятен образуют две различающиеся популяции, что может говорить о двух областях генерации

магнитного поля в солнечном динамо: глубокой (тахоклин) и подповерхностной (лептоклин).

### Публикации:

1. Muñoz-Jaramillo, Andrés; Senkpeil, Ryan R.; ... Tlatov, Andrey G.; Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; Small-scale and Global Dynamos and the Area and Flux Distributions of Active Regions, Sunspot Groups, and Sunspots: A Multi-database Study // The Astrophysical Journal, Volume 800, Issue 1, article id. 48, 19 pp. (2015).

2. Наговицын Ю.А., Певцов А., Осипова А.А. Время жизни и вращение двух популяций групп солнечных пятен // Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2015», Пулково (2015).

3. Наговицын Ю.А., Певцов А., Осипова А.А., Тлатов А.Г. Длительные изменения свойств солнечных пятен // Труды конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2015», Пулково (2015).

# Тема 2.9.2. Новые свойства широтно-временной эволюции локальных и крупномасштабных магнитных полей Солнца в 11-летнем цикле и модели динамо.

Аннотация. Обнаружены новые закономерности широтно-временной эволюции локальных – пятенных – магнитных полей (ЛМП) и напряжённости крупномасштабного фотосферного магнитного поля Солнца (КМП).

Найдено, что широтно-временные зависимости КМП и ЛМП в диапазоне широт ±40° («бабочки Маундера») сходны друг с другом, а изменения во времени индексов мощности КМП и ЛМП хорошо скоррелированы между собой. Получены соотношения, связывающие индексы ЛМП и КМП с квадратами размера соответствующих широтных зон, указывающие на наличие тесной зависимости между интенсивностью магнитного поля и широтным размером этой зоны активности. При усреднении по долготам значений напряженности КМП с учетом полярности скорость широтного дрейфа к полюсам элементов поля одного знака имеет тенденцию к понижению в эпохи максимумов 11-летних циклов по сравнению с эпохами минимумов. Установлено, что средние широты ЛМП (пятен) ведут себя универсальным образом, не зависящим от мощности 11-летнего цикла, а на фазе спада цикла они связаны с текущим уровнем солнечной активности.

Продемонстрировано, как эти особенности могут быть воспроизведены в рамках простых моделей конвективного динамо в тонком слое.

### Публикации:

1. Miletsky, E. V.; Ivanov, & Nagovitsyn, Y. A. Some properties of latitude-time evolution of local and background solar magnetic fields // Advances in Space Research, 2015 vol.55, Issue 3, pp. 780-786.

2. Miletskii E. V and Ivanov V. G. Amplitude–Time Relations at Different Latitudes in the 11yearr Cycle of Solar Activity // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, vol.55, issue 7, pp.872-876.

3. Ivanov, V. G. & Miletsky, E. V. Features of the Spatial Distribution of Spots in the Solar Cycle and a model of a Dynamo in a Thin Layer // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, vol. 55, Issue 8 pp.1076-1080.

4. Miletskii, E. V. Ivanov, V. G. and Nagovitsyn Yu. A. Reversals of Solar Polar Magnetic Field, Amplitudes of 11-year Cycles and Special Points of Sunspot Latitude Parameters // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, vol. 55, Issue 8 pp.1045-1048.

5. Miletskii E. V. Correlations between Time Intervals that Separate Special Points in neighboring 11-year Sunspot Cycles// Geomagnetism and Aeronomy, 2015, vol.55, Issue 8 pp.1049-1053.

### Тема 2.9.3. Создание псевдо-магнитограмм за период 1915-1985 гг.

Аннотация. Разработан метод изучения долговременных изменений магнитных полей Солнца на основе исторических данных наблюдений спектрогелиографов в линии CaIIK. Для этого были использованы синоптические карты за период 1915-1985 гг., созданные на основе ежедневных наблюдений обсерватории Маунт Вилсон. В процессе анализа был разработан новый подход для калибровки интенсивности. Данные наблюдений в линии CaIIK сравнивались с наблюдениями вакуумного магнитографа обсерватории Китт-Пик. Это позволило создать долговременный ряд псевдо магнитограмм за этот период около 60 лет.

### Публикация:

Pevtsov A. A., Virtanen I., Mursula K., Tlatov A., and Bertello L. Reconstructing solar magnetic fields from historical observations I. Renormalized Ca K spectroheliograms and pseudo-magnetograms; A&A, 2015, DOI: <u>http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201526620</u>



Рис. 1. Синоптические карты интенсивности в линии CaIIK (верхняя панель), полярности магнитного потока (в центре) и магнитограмма (нижняя панель) для оборота CR1708. Две стрелки указывают на темные пустоты (соответствующие ядрам солнечных пятен) в центре ярких флоккул. Панель С промасштабирована от ± 100 г (см шкалу на правой стороне панели).

# Тема 2.9.4. Сопоставление фотосферных измерений магнитных полей пятен с магнитометрическими измерениями в радиоастрономии.

Аннотация. Получен статистического материала о структуре магнитного поля от уровня фотосферы до уровней нижней короны. Корональные магнитные поля могут быть измерены на высотах выхода магнитного потока в область высоких корональных температур. При этом, информация может быть получена по анализу соответствующего циклотронного излучения на разных высотах в зависимости от излучаемого типа моды. Проведен анализ сопоставления оптических и радиоастрономических измерений магнитного поля над пятнами в широком диапазоне их величин. Сопоставление с данными фотосферных магнитных измерений дает возможность построения корректной модели магнитосферы над пятном.

### Публикация:

Богод М., Тлатов А.Г.. Сопоставление фотосферных измерений магнитных полей пятен с магнитометрическими измерениями в радиоастрономии, Сборник трудов Десятой ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе" 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РА, В. с. 4

### Тема 2.9.5. Создание базы данных свойств отдельных солнечных пятен за период 1918-1972 гг.

Аннотация. Выполнено выделение солнечных пятен на фотопластинках архива наблюдений солнца в "белом" свете в период с 1920 по 1972 гг. по данным обсерватории
RGO. Целью проведения такой работы было создание каталога не только групп, но отдельных солнечных пятен и промер их различных геометрических характеристик.

Разработаны методики, реализованные в компьютерной программе для анализа изображений автоматического выделения солнечных пятен и пор. Объем оцифрованных и обработанных пластинок составил около 156000 тыс. пластинок, количество выделенных пятен и пор ~280 тыс. После автоматического выделения проводилась выверка результатов в полуавтоматическом режиме. Сравнение площади пятен с данными ручной обработки (www.ngdc.edu) показало высокий коэффициент корреляции (R~0.98) и абсолютных величин среднемесячных значений. Установлены новые факты о характеристиках солнечных пятен в циклах активности: распределения по площади в 16-20 циклах активности, особенности взаимного положение пятен в группах, связи интенсивности и площади и другие.

#### Публикация:

Тлатов А.Г., Скорбеж Н.Н., Коломиец С.Н. Характеристики солнечных пятен по данным обработки архива фотопластинок гринвичской обсерватории 1920-1972, Сборник трудов Десятой ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе" 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РАН, с. 15.



Рис. 2. Среднемесячные значения площади в единицах мдп, полученные в данной реконструкции (сверху) и по данным каталога GPR (внизу).

### Тема 2.9.6. Анализ изменений магнитных полей солнечных пятен в 11-ти летнем и вековом циклах активности.

Аннотация. Выполнен анализ долговременных измерений магнитного поля солнечных пятен по данным обсерватории Маунт Вилсон, на основе оцифровки напряженности магнитных полей *B* и площади ядер солнечных пятен и пор в период 1918-2014 гг. Проведено сопоставление с данными наблюдений магнитных полей Крымской астрофизической обсерватории в период 1957-2014 гг. и данными магнитографов SOHO/MDI и HMI/SDO Показано, что на масштабе времени 100 лет, для больших пятен (S>20 мдп) существенные долговременные изменения напряженности магнитных полей отсутствуют. Для малых пятен и пор в измерениях существуют артефакты, связанные с инструментальными эффектами. Анализ изменений напряженности магнитных полей пятен в цикле активности для пятен одинаковой площади не выявил изменений с фазой солнечного цикла.

#### Публикация:

Тлатова К.А., Васильева В.В., Тлатов А.Г. Изменения магнитных полей солнечных пятен в 11-ти летнем и вековом циклах активности // Сборник трудов Х ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе" 16-20 февраля 2015Г., ИКИ РАН, с. 38

Руководители проекта: Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов (ГАО РАН), Состав группы: Е.В. Милецкий, В.Г. Иванов, К.А. Тлатова, В.В. Васильева, Н.Н. Скорбеж.

Проект 2.10. Исследования процессов ускорения ионов и электронов в солнечных вспышках по результатам измерений рентгеновского и гамма-излучения в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД и в экспериментах ГЕЛИКОН и ИРИС на солнечной обсерватории КОРОНАС-Ф.

Аннотация. Наличие во вспышечной петле флуктуаций магнитного поля с  $n = \delta B/B = 10^{-3}$  приводит к существенному увеличению потока жесткого рентгеновского излучения (ЖРИ) из оснований магнитных петель в случае изотропного источника электронов и существенному усилению интенсивности ЖРИ в корональной части петли в случае анизотропного источника.

Развитие методов решения кинетического уравнения для функции распределения ускоренных электронов с учетом возможного процесса рассеяния на магнитных неоднородностях позволяет более полно рассмотреть динамику распространения электронов в магнитных полях активных областей во время солнечных вспышек. Критерием выбора модели является адекватность рассчитанных параметров жесткого рентгеновского и радио- излучений наблюдаемым в космических экспериментах подобным величинам. В данной работе дополнительно рассматривается процесс рассеяния на неоднородностях магнитного поля. Вопрос об их наличии, величине и возможном спектре детально не обсуждается. Однако это не делает подобное рассмотрение не реальным. Наличие магнитных неоднородностей малых по величине в области энерговыделения во время вспышек рассматривается в литературе довольно часто. Учет дополнительного рассеяния на неоднородностях с уровнем  $n = \delta B/B = 10^{-3}$ приводит к существенному увеличению яркости ЖРИ, что является следствием изотропизации электронов в питч-угловом пространстве и увеличения числа захваченных электронов. В случае изотропного распределения электронов в момент их инжекции в замкнутую петлю магнитного поля дополнительное увеличение яркости ЖРИ происходит в основаниях петель (рис. 1 a, b) а для анизотропных распределений электронов дополнительное увеличение яркости ЖРИ отмечается преимущественно в вершине петли (рис. 2 a, b). Такое различие в распределении яркости ЖРИ в этих моделях связано с тем что, в изотропном случае в вершине петли процесс рассеяния электронов на магнитных неоднородностях приводит к уменьшению числа электронов в вершине по сравнению с чисто кулоновским рассеянием (рис. 1) (т.к. распределение электронов по поперечным импульсам переходит в изотропное) и к их захвату в промежуточной области (т.к. распределение электронов по продольным импульсам переходит в изотропное и доля электронов с питч-углами в области 90 градусов возрастает). В анизотропном же случае в вершине распределение электронов по питч-углам – квазипродольное, a не квазипоперечное, как в изотропном случае. Поэтому, в анизотропной модели изотропизация электронов приводит к усиленному захвату электронов как в вершине петли, так и в промежуточной части петли. В не симметричных моделях усиление в вершине и ногах петли может быть разным и зависит от степени не симметричности углового распределения электронов в инжекторе. Подобное влияние магнитной турбулентности имеет место для достаточно высоких значений параметра  $\eta = \delta B/B = 10^{-3}$ . С уменьшением п роль рассеяния на неоднородностях снижается и становится несущественной при  $\delta B/B \le 10^{-5}$ .



Рис. 1.



Проведен анализ данных жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек зарегистрированного спектрометром ВАТЅЕ. Для рентгеновских профилей разных энергий определены временные задержки и построен их спектр. Проанализировано рентгеновское излучение 82 вспышек и выделены три типа спектров временных задержек – спектры, возрастающие с ростом энергии квантов, спадающие и U-образные. Для интерпретации спектров задержек рассмотрена модель кинетики ускоренных электронов, распространяющихся в плазме вспышечной петли со сходящимся магнитным полем. Проанализированы два случая инжекции электронов – изотропная и инжекция в некотором конусе питч – углов. Особо следует отметить, что спадающие с ростом энергии спектры задержек удается объяснить только в случае пространственного разнесения областей ускорения и инжекции и/или при наличии магнитных флуктуаций и малого изменения магнитного поля с высотой. Расчеты показали так же различные типы спектров задержек в вершине и основаниях петли, что определяется динамикой электронов в петле при выборе различных начальных условий, геометрии петли, пространственной локализации областей ускорения и инжекции.

Обработаны данные рентгеновского спектрометра Конуса-Винда для солнечных вспышек 2014-02-25 00:42:44 UT, 2014-03-03 15:57:21 UT, 2014-03-12 22:31:49.228 UT, 2014-03-28 23:49:02.910 UT, 2014-03-29 17:45:19.106 UT, 2014-04-25 00:20:10.166 UT. Проведено сравнение временных профилей в мягком рентгеновском излучении, полученных на

спутнике GOES в двух каналах и Конус-Винде в трех каналах. Примеры приведены на рис 3.



Рис. 3. Временные профили: спектрометр Конус-Винд.

Разработана процедура для пакета XSPEC, позволяющая фитировать энергетические спектры моделью тормозного излучения электронов со степенным спектром в модели толстой мишени. Произведен спектральный анализ вспышек 2012-07-06 01:38:37.394 UT, 2012-08-18.

Проведены расчеты направленности и степени поляризации жесткого рентгеновского и гамма излучения солнечных вспышек из различных областей вспышечных петель на основе численного моделирования динамики ускоренных электронов, инжектированных в вершину петли. Рассмотрен вариант длительной инжекции ускоренных электронов. В модели изотропной инжекции максимальная степень поляризации фотонов с энергией 30 кэВ достигает 25% в вершине петли и уменьшается к основаниям петли, меняя при этом знак. Для анизотропного распределения электронов в момент их инжекции ситуация совсем иная. Во-первых, знак степени поляризации отрицательный и величина достигает значительно больших значений, достигая 50% для фотонов с энергией 30 кэВ и к моменту максимума инжекции. В основании петли степень поляризации уменьшается значительно, постепенно уменьшаясь до 0. С ростом энергии квантов степень поляризации уменьшается по всей длине петли. В модели анизотропной инжекции отсутствует симметрия значений степени поляризации ЖРИ из левого и правого оснований. В противоположном от направления инжекции основании степень поляризации 68

незначительна, не превышает несколько процентов. Такие различия могут наблюдаться в измерениях степени поляризации в будущих экспериментах с пространственным разрешением.

Руководитель проекта: Чариков Ю.Е. (ФТИ им. Иоффе).

Состав группы: Кудрявцев И.В., Шабалин А.Н., Лысенко А., Склярова Е.М. (ФТИ им. Иоффе).

#### Публикации:

1. *V. F. Melnikov, Yu. E. Charikov, I. V. Kudryavtsev,* Directivity and Polarization Dynamics of Hard X\_Ray and Gamma\_Ray Emission of a Flare Loop // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 7, p. 983.

2. *Yu. E. Charikov, V. I. Globina, A. N. Shabalin, and E. Elfimova*, Localization of Electron Acceleration in Solar Flares Based on the Spectrum Analysis of Hard X\_ray Time Delays // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 7, p. 1000.

3. Yu. E. Charikov and A. N. Shabalin, Influence of Magnetic Turbulence on the Propagation of Accelerated Electrons and Hard X\_Ray Brightness Distribution in Solar Flares// Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 8, p. 1.

Проект 2.11. Выявление вклада естественных и антропогенных факторов в изменения глобального климата Земли, оценка возможных климатических последствий различных солнечно-космических явлений и разработка сценариев возможной эволюции климата Земли в 21-м веке на основе анализа инструментальных, исторических и палеоданных об изменении ряда природных характеристик.

# Тема 2.11.1. Продолжительность текущего межледникового периода и межледниковые интервалы последнего миллиона лет.

Аннотация. Показано, что нынешний тёплый межледниковый период должно скоро закончиться.

Для понимания механизмов изменений климата важно исследовать закономерности колебаний орбитальных параметров Земли во времени и пространстве, а также циклический характер колебаний климата, его долговременные тенденции, колебания

общей энергии солнечного излучения, включающего солнечную активность, связь с общей циркуляции атмосферы и др. и установить связь между этими процессами.

В данной работе критически проанализированы имеющиеся данные по изменению орбитальных элементов Земли, солнечной инсоляции, изменению климата на шкале последних миллионов лет и обсуждена проблема продолжительности современного межледникового периода (голоцен). Получение детальной информации о закономерностях изменения климата на большой шкале времени связано с изучением ледниковых щитов Гренландии и Антарктиды и океанических отложений.

Подобными в астрономическом плане современному межледниковью аналогами являются межледниковья, приходящиеся на стадии около ~ 400 и ~ 800 тысяч лет назад, связанные с изменением 400-летнего периода солнечной инсоляции, экстремум изменения которой имеет место в настоящее время. Эти три межледниковых интервала показывают довольно подобное широтное и сезонное распределение поступающего солнечного излучения и показывают общие черты в наклоне земной оси и главным образом в эксцентриситете, но отличаются по продолжительности. Наиболее длительным межледниковым периодом оказалось межледниковье, приходящееся на окрестность 400 тыс. лет назад. Установлено, что фаза между прецессией и наклоном оси между ними отличается. Анализ показал, что целом, межледниковье, которое имело местности в окрестности ~800 тыс. лет назад, является лучшим аналогом современного межледниковья. В таком случае нынешнее межледниковье должно скоро закончится.

#### Публикация:

V.A. Dergachev (2015) Length of the Current Interglacial Period and Interglacial Intervals of the Last Million Years. *Geomagn. Aeron.*, V. 55, №7, P. 945-952.

Тема 2.11.2. Природа долговременных корреляционных связей между состоянием облачности и вариациями потока галактических космических лучей.

Аннотация. Установлены связи между аномалиями нижней облачности и интенсивностью галактических космических лучей.

Исследована природа долговременных корреляционных связей между аномалиями нижней облачности и интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ), а также возможные причины изменения характера этих связей в начале 2000-х гг. Показано, что влияние ГКЛ на состояние облачности в умеренных широтах тесно связано с эффектами

ГКЛ в вариациях интенсивности внетропического циклогенеза. Высокие значения коэффициентов положительной корреляции между нижней облачностью и потоками ГКЛ, наблюдавшиеся в 1983–2000 гг., обусловлены тем, что в указанный период увеличение потоков ГКЛ сопровождалось усилением циклонической активности в умеренных широтах. Возможной причиной нарушения корреляции между облачностью и потоками ГКЛ в начале 2000-х гг. является обращение знака эффектов ГКЛ в развитии внетропических барических образований в связи с изменением состояния стратосферного циркумполярного вихря.

#### Публикация:

С.В Веретененко., М.Г Огурцов. (2015) Природа долговременных корреляционных связей между состоянием облачности и вариациями потока галактических космических лучей. *Геомагн. Аэрон.*, Т. 55, №5, С. 457-465.

# Тема 2.11.3. Оценка влияния изменений поверхностной температуры на концентрацию радиоуглерода на различных временных интервалах.

**а)** Аннотация. Оценены температурные коэффициенты, определяющие скорость перехода радиоуглерода из океана в атмосферу Земли с момента окончания последнего оледенения до начала современного межледниковья.

Радиоуглеродные данные в природных архивах содержат информацию не только об изменении интенсивности галактических космических лучей в прошлом, но также и о климатических изменениях. В связи с этим встает вопрос об адаптации моделей, описывающих обмен <sup>14</sup>С между природными резервуарами, для разделения космического и климатического влияния на радиоуглеродные данные.

В работе рассмотрен временной интервал с 17000 лет до нашей эры до – 10000 лет до нашей эры (наступление межледникового периода). Этот временной интервал характеризуется окончанием последнего ледникового периода и началом Голоцена. Особенностью данного временного интервала является продолжительный рост глобальной температуры и концентрации CO<sub>2</sub> в земной атмосфере. При этом, происходит перераспределение CO<sub>2</sub> (в том числе <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>) между океаном и атмосферой. В результате численного моделирования получены возможные значения для температурного

коэффициента, определяющего скорость перехода изотопа <sup>14</sup>С из океана в атмосферу Земли.

#### Публикация:

Kuleshova, V. A. Dergachev, I. V. Kudryavtsev, Yu. A. Nagovitsyn, M. G. Ogurtsov (2015). Possible Influence of Climate Factors on the Reconstruction of the Cosmogenic Isotope <sup>14</sup>C Production Rate in the Earth's Atmosphere and Solar Activity in Past Epochs. *Geomagn. Aeron.*, 2015, V. 55, No. 8, P. 1071.

**б)Аннотация.** Оценены температурные коэффициенты, определяющие скорость перехода радиоуглерода из океана в атмосферу Земли с 1511 по 1945 год.

Рассмотрено возможное влияние вариаций приземной температуры на концентрацию радиоуглерода в атмосфере Земли в 1511-1945 гг. Показано что согласие расчётной и экспериментальной кривых по  $\Delta^{14}$ С улучшается при учёте влияния вариаций температуры на (а) скорость обмена радиоуглеродом между атмосферой и океаном (б) атмосферное значение CO<sub>2</sub>.

#### Публикация:

M. G Ogurtsov., V. A. Dergachev, I. V Koudriavtsev., Yu. A Nagovitsyn., V. M. Ostryakov (2015) Possible contribution of surface temperature variation to the radiocarbon concentration in the Earth's atmosphere. *Geomagn. Aeron.*, V. 55, №7, P. 931-938.

#### Тема 2.11.4. Поведение солнечной активности во время Маундеровского минимума

Аннотация. Выделены возможные циклы в Маундеровский минимум солнечной активности.

Применяя статистику активных дней, исследовано поведение солнечной активности во время Маундеровского минимума (1645-1715), определен верхний предел на уровень активности и выделены возможные циклы активности.

#### Публикация:

J.M. Vaquero, Kovaltsov G. A., Usoskin I.G., Carrasco V. M. S., and Gallego M. C. (2015). Level and length of cyclic solar activity during the Maunder minimum as deduced from the active-day statistics. *Astron. Astrophys.*, V. 577, A71, 2015.

Руководитель проекта: В.А. Дергачёв (ФТИ им. Иоффе).

Проект 2.12. Исследование ультратонких хромосферных петель и их вспышечной активности.

## Тема 2.12.1. Исследование ультратонких хромосферных петель и их вспышечной активности.

Аннотация. Обнаружение ультратонких компактных горячих магнитных петель в хромосфере позволяет предполагать, что хромосфера играет существенную роль в солнечной активности, в частности, в нагреве короны. Эти петли простираются до основания короны и могут служить одним из источников коронального нагрева.

Хромосферные петли выходят из областей, расположенных между гранулами, где имеются сходящиеся потоки фотосферной конвекции. Поэтому можно предположить, что эти петли возникают за счет сгребания и магнитного поля конвекцией. Мы рассмотрели нагрев плазмы в магнитных петлях, сформированных сходящимися потоками фотосферной плазмы в узлах нескольких грануляционных ячеек или на границах соседних гранул. В результате взаимодействия конвективных потоков фотосферной плазмы с магнитным полем в основаниях петли здесь генерируются достаточно большие электрические токи, диссипация которых приводит к эффективному нагреву плазмы. При этом основным каналом диссипации является проводимость Каулинга, связанная с ионноатомными столкновениями в замагниченной плазме. Источник нагрева сосредоточен в основаниях петли в интервале высот до нескольких сотен километров, где происходит увеличение температуры до значений порядка миллиона градусов. Нагрев более высоких слоев происходит за счет теплопроводности, которая находится в балансе с радиационными потерями. При этом относительно небольшая длина хромосферных петель является причиной того, что температура мало меняется от основания к вершине и петля остается практически изотермичной. Получены самосогласованные значения температуры, давления и концентрации плазмы в горячих хромосферных петлях по заданным значениям скорости конвекции магнитного поля, полутолщины трубки и высоты, на которую фотосферная конвекция проникает в хромосферу. Температура плазмы в трубке растет с увеличением скорости конвекции и магнитного поля, что может объяснить существование значительно более горячих петель у звезд поздних спектральных классов, которые отличаются от Солнца более развитыми конвективными

зонами, а также большими по сравнению с Солнцем магнитными полями. Дана оценка собственных частот колебаний ультратонкой магнитной петли как эквивалентного электрического контура и указана возможная причина выбросов горячей плазмы из оснований петель.

#### Публикация:

V. V. Zaitsev, Ultrafine Magnetic Structures in the Chromosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2015, Vol. 55, No. 7, pp. 846-849.

## Тема 2.12.2. Кинетическое описание трехмерных магнитосфероподобных структур в расширяющихся горячих плазменных коронах над магнитоактивными областями.

Магнитосфероподобные (корональные) структуры – универсальные крупномасштабные объекты плазменной астрофизики и солнечно-земной физики, образованные квазистационарными и нестационарными высокоскоростными потоками плазмы. Как правило, описание таких структур развивается в рамках 2D МГД приближения, предполагающего локальность материальных связей.

Мы обращаем внимание на то, что корональные структуры часто существуют при высокой температуре и являются бесстолкновительнми, что требует развития их кинетического описания. В кинетическом описании особенности горячей короны обусловлены возбуждением диамагнитной и резистивной компонент плотности индукционного тока. В трехмерном кинетическом описании размеры корональных структур выражаются через масштабы пространственной дисперсии кинетической природы, которые характеризуют нелокальность материальных связей в короне и которые отсутствуют в МГД описании.

Представлены три задачи физической кинетики корональных структур, соответствующие предельным значениям величин э.м. добротности потока G, зависящего от функции распределения частиц потока. Это трехмерная структура отдельного стримера и его топологическая перестройка при изменениях добротности G от G<<1 до G>>1, двумерная структура пояса взаимодействующих корональных стримеров в гелиосферном диске (G>>1) и импульсная электродинамика одномерного горячего слоя токонесущей плазмы, самосогласованная с токами ускоряемых в ней частиц (G=-1).

#### Публикации:

 V. M. Gubchenko Kinetic Description of the 3D Electromagnetic Structures Formation in Flows of Expanding Plasma Coronas. I: General. 2015.Vol. 55, No. 7, 831-845.
V. M. Gubchenko Kinetic Approach to the Formation of the 3D Electromagnetic Structures in Flows of Expanding Plasma Coronas. II. Flow Anisotropy Parameters. 2015.Vol. 55, No. 8, 1009-1025.

Руководитель проекта: В.В.Зайцев (ИПФ РАН). Состав группы: В.В.Зайцев (ИПФ РАН), В.М.Губченко (ИПФ РАН).

## Проект 2.13. Глобальные комплексы активности и соотношение магнитных полей различных пространственных масштабов.

**Тема 2.13.1.** Предложен наблюдательный тест по выявлению действию мелкомасштабного солнечного динамо в глубине солнечной конвективной зоны по статистике групп солнечных пятен, нарушающих правило полярности Хейла. Этот тест реализован и подтвердил существование мелкомасштабного динамо в глубинах конвективной зоны, что ранее подвергалось сомнению в работах Стенфло.

#### Публикации:

1. Д.Д. Соколов, А.И. Хлыстова, В.И. Абраменко, Мелкомасштабное динамо и магнитное поле Солнца, Х ежегодная конф. Физика плазмы в солнечной системе, ИКИ РАН, 2015. стр. 13.

2. Sokoloff D., Khlystova A., Abramenko V., Solar small-scale dynamo and polarity of sunspot groups, MNRAS, 451, 6040–6045, 2015.

**Тема 2.13.2.** Предложена новая концепция Глобальных комплексов активности, заключающаяся в объединении в рамках единого понятия объектов глобальных и локальных полей.

Традиционно в течение многих лет комплексы активности определялись только на основе наблюдений активных областей. Показано, что Глобальный комплекс включает в себя Корональные дыры и Активные области. Для анализа использовался большой набор данных наблюдений магнитного поля разных пространственных масштабов, наблюдения активных областей и магнитных полей SOHO MDI, наблюдения корональных дыр в

ультрафиолетовом диапазоне. Показана общность эволюции корональных дыр и активных областей в едином комплексе. Обсуждается проблема связи полей разных масштабов в процессе генерации цикла.

#### Публикация:

Vladimir N. Obridko and Bertha D. Shelting Coronal Holes in Global Complexes of Activity Hindawi Publishing Corporation Advances in Astronomy Volume 2015, Article ID 438124, 9 pages <u>http://dx.doi.org/10.1155/2015/438124</u>

**Тема 2.13.3.** Завершено исследование северо-южной асимметрии солнечной активности при использовании нового подхода, когда асимметрия рассматривается как суперпозиция двух функций – знака асимметрии и ее модуля (абсолютного значения). Показано, что знак асимметрии определяет ее основные характеристики временной ход и наличие в ней квазидвухлетних колебаний. Общий временной ход знака асимметрии рассмотрен как последовательность монохромных интервалов. Рассмотрена статистика этих интервалов и показано, что их поведение во времени характеризует поведение самой асимметрии. Абсолютные значения асимметрии (модуль) характеризуются строгой цикличностью с периодом 11 лет, схожим с числами Вольфа со сдвигом в полцикла. Показано, что модуль асимметрии обладает прогностическими возможностями – чем больше значение модуля асимметрии в минимуме цикла активности, тем ниже следующий цикл.

#### Публикации:

 Бадалян О.Г., Обридко В.Н. Свойства северо-южной асимметрии солнечной активности как суперпозиции двух реализаций – ее знака и абсолютной величины. Труды ежегодн. конф. "Солнечная и солнечно-земная физика – 2015". Стр.19.

2. O. G. Badalyan, V. N. Obridko, North-South asymmetry of the solar activity as a superposition of two realizations -- the sign and absolute value, A&A (in press).

**Тема 2.13.4.** Предложен и обоснован новый механизм ускорения частиц в солнечном ветре до энергий порядка 1-1.5 МэВ, который способен объяснить часто наблюдающиеся нетипичные всплески интенсивности потока энергичных протонов и электронов на околоземной орбите [1-6], не связанные со вспышками или ускорением частиц на ударных волнах. Общепринятая точка зрения гласит, что частицы могут быть ускорены до таких энергий либо (1) на Солнце (во вспышках), либо (2) близко к Солнцу (на ударной волне

СМЕ – выброса корональных масс), либо (3) на ударных волнах (forward and reverse shocks), ассоциирующихся с областью взаимодействия медленных и быстрых потоков (CIR-corotating interaction region). Во всех случаях ускорение происходит далеко от Земли, и наблюдатели, находящиеся на одном и том же расстоянии от Солнца и разделенные углом в пару десятков градусов, должны фиксировать схожие вариации потока энергичных протонов и электронов. Однако зачастую вариации интенсивности имеют абсолютно разный профиль или наблюдаются с задержкой, явно соответствующей времени вращения какой-то локальной структуры с солнечным ветром от одного аппарата к другому [5, 6].





Рис. 1. Верхняя панель: мелкогофрированная структура ГТС по наблюдениям STEL (слева) и иллюстрация магнитной полости внутри ГТС, заполненной магнитными островами [5, 6] и формирующей природный токамак. Нижняя панель: увеличение интенсивности потока энергичных протонов в полости, заполненной магнитными островами. Полость сформирована ГТС (HCS) и токовыми слоями, принадлежащими CIR [6].

Показано, что подобные случаи связаны с пересечением областей, заполненных мелкомасштабными магнитными островами (1~0.01-0.001а.е.) и ограниченных

магнитными стенками, представляющими собой токовые слои разного масштаба и формы [5-7]. В соответствии с теорией, развиваемой в [1-4], динамические процессы в магнитных островах (такие как их слияние или сжатие) приводят к локальному ускорению частиц, имеющих до этого лишь небольшое предускорение. Такое изначальное ускорение может являться следствием стандартных механизмов придания частицам дополнительной энергии, а также следствием магнитного пересоединения в токовых слоях, в частности, в гелиосферном токовом слое (ГТС) [8] или его окрестности – плазменном слое [9]. Слияние магнитных островов наблюдается преимущественно вблизи ГТС, а сжатие возникает в результате взаимодействия ГТС с СМЕ и СІR [5, 6]. Оба эти процесса характерны для области за фронтом межпланетных ударных волн [6].

#### Публикации:

1. Zank G.P., le Roux J.A., Webb G.M., Dosch A., and O. Khabarova. Particle acceleration via reconnection processes in the supersonic solar wind. The Astrophysical Journal, 797, 1, 28 (18pp), 2014

2. le Roux J. A., Zank G. P., Webb G. M., and Khabarova O. A kinetic transport theory for particle acceleration and transport in regions of multiple contracting and reconnecting inertial-scale flux ropes. The Astrophysical Journal, 801, 2, 112, 2015, doi:10.1088/0004-637X/801/2/112

3. Zank G.P., Hunana P., Mostafavi P., le Roux J.A., Li Gang, Webb G.M. and Khabarova O. (2015), Particle acceleration by combined diffusive shock acceleration and downstream multiple magnetic island acceleration. Journal of Physics: Conference Series, Volume 642, doi:10.1088/1742-6596/642/1/012031

4. le Roux J.A., Webb G.M., Zank G.P. and Khabarova O. (2015), Energetic Ion Acceleration by Small-scale Solar Wind Flux Ropes, Journal of Physics: Conference Series, Volume 642, doi:10.1088/1742-6596/642/1/012015,

5. Khabarova O., G.P. Zank, G. Li, J.A. le Roux, G.M. Webb, A. Dosch, O.E. Malandraki. (2015), Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration. 1. Dynamics of magnetic islands near the heliospheric current sheet. The Astrophysical Journal, 808, 181, doi:10.1088/0004-637X/808/2/181

6. Khabarova O. V., G. P. Zank, G. Li, J. A. le Roux, G. M. Webb, O. E. Malandraki and V. V. Zharkova (2015), Dynamical small-scale magnetic islands as a source of local acceleration of particles in the solar wind, Journal of Physics: Conference Series, Volume 642, doi:10.1088/1742-6596/642/1/012033

7. Xu F., Li G., Zhao L., Zhang Y., Khabarova O., Miao B., le Roux J., Angular distribution of solar wind vector magnetic field at 1 AU. The Astrophysical Journal, 801, 1, 58 (7pp), 2015, doi:10.1088/0004-637X/801/1/58

8. Zharkova V. & Khabarova O., Re-acceleration of solar wind particles in current sheets of the heliosphere. (2015), Ann. Geophys., 33, 457–470, doi:10.5194/angeo-33-457-2015

9. Kislov R. A., O. V. Khabarova, H. V. Malova (2015), A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet and the plasma sheet, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, doi:10.1002/2015JA021294.

Руководители проекта: В.Н. Обридко, В.Д. Кузнецов (ИЗМИРАН).

Проект 2.14. Исследование геоэффективности крупномасштабных структур солнечного ветра.

## Тема 2.14.1. Исследование геоэффективности крупномасштабных структур солнечного ветра.

**а)** Аннотация. Исследовано временное поведение параметров в возмущенных типах течения солнечного ветра.

#### Публикация:

Yermolaev Yu. I., I. G. Lodkina, N. S. Nikolaeva, M. Yu. Yermolaev. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis, J. Geophys. Res. Space Physics, 2015, DOI: 10.1002/2015JA021274.

**б)** Аннотация. Исследована зависимость временного хода магнитной бури от типа солнечного ветра

#### Публикации:

1. Ермолаев Ю. И., И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев, Зависит ли длительность фазы восстановления магнитной бури от скорости развития бури на ее главной фазе? Геомагнетизм и Аэрономия, 2015, том 55, № 4, с. 435–439.

2. Николаева Н. С., Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Моделирование временного хода корректированного Dst\* индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра, Космические Исследования, 2015, том 53, № 2, с. 126–135.

**в)** Аннотация. Исследована зависимость насыщения потенциала полярной шапки от типа солнечного ветра.

#### Публикация:

Nikolaeva, N., Yermolaev, Y., Lodkina, I., Predicted dependence of the cross polar cap potential saturation on the type of solar wind stream, Advances in Space Research , Volume 56, Issue 7, 1 October 2015, Pages 1366–1373 doi:10.1016/j.asr.2015.06.029.

Руководитель проекта: Ермолаев Ю.И. ИКИ РАН.

Тема 2.14.2. Построение и анализ МГД модели разрывных структур солнечного ветра, вызывающих генерацию плазменных неоднородностей в окрестности магнитосферы Земли.

Аннотация. На примере взаимодействия солнечного вращательного разрыва с носовой ударной волной и магнитослоем впервые доказана возможность возникновения уплотнённой плазменной неоднородности типа «плато» внутри магнитослоя перед магнитосферой Земли.

На основе рассмотрения множества данных космических аппаратов типа ISEE, THEMIS, CLUSTER и GOES можно утверждать наличие в солнечном ветре крупномасштабных (при характерном размере, большим протонного радиуса Лармора) магнитогидродинамических разрывных структур, связанных с часто наблюдаемыми разрывами направления, при переходе через которые скачком меняется направление магнитного поля. К этим разрывам относятся стационарные тангенциальные разрывы и нестационарные вращательные разрывы (А), бегущие по потоку солнечного ветра МГД и возмущающие систему головная ударная волна – магнитосфера.

Взаимодействие A с головной ударной волной (ГУВ) Земли может приводить к возникновению в магнитослое различного вида вторичных волн и неоднородностей, которые сопровождаются изменением величины плотности частиц, магнитного поля и динамического давления в магнитослое. Изучение таких неоднородностей представляет интерес, так как сопровождающее их повышенное давление вызывает смещение магнитопаузы к Земле, а некоторые вторичные волны заставляют фронт ГУВ двигаться по направлению к Солнцу.

Следует обратить внимание на разницу в механизме образования во многом похожих структур. Стационарные структуры типа солнечных магнитных дыр переносятся солнечным ветром и обычно являются структурами с постоянным давлением. В то же время при некоторых условиях возникают плазменные структуры, имеющие повышенную плотность протонов и низкое значение магнитного давления. Такие структуры наблюдались в магнитослое на космических аппаратах ISEE-1, 2 [1].

В рамках приближения идеальной МГД, используя МГД метод [2], рассмотрим плоскополяризованное взаимодействие A с ГУВ  $S_b$  в некоторой окрестности подсолнечной точки (рис. 1).



Рис. 1. Схема взаимодействия

Межпланетное магнитное поле  $\mathbf{B}_{sw}$ , наклонено под углом  $\boldsymbol{\psi}_{B}$  к направлению скорости солнечного ветра  $\mathbf{V}_{sw}$  и лежит в плоскости эклиптики. Угол между касательной к  $S_b$  и направлением  $\mathbf{V}_{sw}$  обозначен  $\alpha$ . Начало координат соответствует подсолнечной точке, в которой  $\alpha = 90^{\circ}$ . Так как задача плоскополяризована, взаимодействие происходит в плоскости эклиптики.

Падение А на ГУВ можно рассматривать как частный случай решения проблемы Римана-Кочина о распаде произвольного разрыва. По мере продвижения А по направлению к Земле точка взаимодействия D смещается, возникают различные комбинации волн в результате распада начального разрыва.

Известно, что в широкой окрестности подсолнечной точки, при  $\alpha = 60^{\circ} - 90^{\circ}$ , волновая картина течения может быть представлена следующими наборами волн:  $S'_b S^-_b C S^-_f A_f R^+_f$  на

верхнем фланге и  $S_b^{'}S_b^{-}CS_f^{-}A_f^{'}S_f^{+}$  на нижнем фланге. Индекс *f* относится к волнам, идущим к Земле, а *b* – от Земли.

На самой подсолнечной точке интенсивность быстрой волны разрежения  $R_f^+$  и быстрой ударной волны  $S_f^+$  равны нулю. В некоторой ее окрестности интенсивность этих волн мала, а интенсивности медленных ударных волн  $S_b^-$  и  $S_f^-$  близки.

Таким образом, в результате взаимодействия A и ГУВ может образоваться разрыв  $A_f$ , преломленный в магнитослой, две медленные ударные волны  $S_b^-$ ,  $S_f^-$  и контактный разрыв *C* между ними, который со временем исчезает в результате диффузии заряженных частиц.

Рассмотрим задачу распада произвольного разрыва  $AS_b \rightarrow S_b^{'}S_b^{-}CS_f^{-}A_f^{'}$ , когда интенсивности некоторых разрывов равны  $|S_b| = |S_b^{'}|, |S_b^{-}| = |S_f^{-}|$ .

Параметры возмущенного солнечного ветра за A и ГУВ находятся из соотношений на сильных МГД разрывах.

На контактном разрыве должны быть выполнены 4 независимых граничных условия – непротекания плазмы и непрерывности скорости, давления и магнитного поля. Так как альфвеновский разрыв плоско-поляризован, тангенциальная составляющая магнитного поля поворачивается на угол 180° вокруг нормали  $n_A$ . В области перед новым альфвеновским разрывом  $A'_f$  получены новые значения параметров  $\psi_{B2}$ =66°,  $N_2$  =2.63. В магнитослой проникает преломленный альфвеновский разрыв  $A'_f$ , существенно усилившийся при взаимодействии с  $S_b$ . Контактный разрыв неустойчив и со временем он исчезает в результате диффузии.

Образованные в результате распада медленные ударные волны *S*<sup>-</sup>, прямая и обратная, движутся в разные стороны, но сносятся в направлении Земли. В медленных ударных волнах плотность растет, а величина магнитного поля и вместе с ним значение магнитного давления P<sub>b</sub> убывает.

Таким образом, в магнитослое за счёт влияния двух медленных ударных волн может образоваться «плато», в котором плотность возрастает, а магнитное давление падает примерно в два раза (рис.2).



Рис. 2. Неоднородность типа плато в магнитослое.

Неоднородность типа плато с увеличенной плотностью и уменьшенным магнитным полем неоднократно наблюдалась в магнитослое на космическом аппарате.

Так на аппарате ISEE 2, находящимся в магнитослое перед магнитосферой Земли, 17 сентября 1978 года наблюдалась плазменная неоднородность с увеличением плотности протонов N и с уменьшением величины магнитного поля В [1]. При этом максимальное значение величины плотности отмечалась в период времени с 1533UT до 1609 UT (рис. 3).



Рис. 3. Данные о плазме и магнитном поле в магнитослое, полученные 17 сентября 1978 г. с помощью космических аппаратов типа ISEE.

Такого же рода плазменная неоднородность типа плато по плотности заряженных частиц наблюдалась на ISEE-1 в магнитослое 5 сентября 1978 года (рис. 4).



Рис. 4. Данные измерений плотности частиц, компонент скорости, температуры, компонент магнитного поля, давления магнитного поля и газокинетического давления при движении ISEE1 в плазме магнитослоя 5 сентября 1978 года [1]. Уплотнение – с 0412UT

#### до 0434UT.

Важно обратить внимание на зависимость механизма возникновения МГД волн в магнитослое от интенсивности и ориентации вращательного разрыва, приходящего со стороны солнечного ветра. Таким образом, представляет интерес рассмотреть взаимодействие солнечных вращательных разрывов с системой *носовая ударная волна* – *магнитослой* – *магнитосфера Земли* при различных параметрах солнечного ветра и вращательного разрыва и, главное, при различных направлениях межпланетного магнитного поля.

В последнее время во многих международных журналах [3, 4, 5, 6, 7] было указано на непосредственное подтверждение результатов, полученных руководителем рассматриваемой темы при использовании теоретических МГД методов, на космических аппаратах.

#### Литература

1. Song P., Russell C.T. and Thomsen M.F., Slow mode transition in the frontside magnetosheath, Journ. Geophys.Res, v.97, 8295-8305, 1992.

2. Пушкарь Е.А. Трехмерная волновая картина течения и интенсивности волн, образующихся при падении вращательного разрыва солнечного ветра на околоземную головную ударную волну. Известия МГИУ 2010, №2 (19) 2010, с.68-88.

84

3. *Goncharov O., Shafrankova, Nemechek Z.*, interplanetary shock – bow shock interaction: Comparison of a global MHD model and observation. Plan.Space Sci.,v.115, pp.4-11, 2015.

4. *Pallocchia G.* A sunward propagating fast wave in the magnetosheath observed after the passage of an interplanetary shock. Journ Geophys.Res.Space Physics, v.118, 331-339, 2013.

5. *Nemechek Z., Shafrankova J., Koval A., Merka J., Prech L.* MHD analysis of propagation of an interplanetary shock across magnetospheric boundaries. Journ.Atmosph.and Solar-Terr.Physics, 73, p.20-29, 2011.

6. *Pallocchia G., Samsonov A.A., Bavassano Cattaneo M.B.et al.* Interplanetary shock transmitted into the Earth's magnetosheath: Cluster and Double Star observations. Ann.Geophys. 28, 1141-1156, 2010.

7. *Goncharov O., Shafrankova J., Nemechek Z., Prech L.* IMF rotations following interplanetary shocks: their influence on the interaction with magnetosphere. Acta Universitatis Carolinae - Mathematica et Physica, v.53, 2, 79-86, 2012.

Руководитель темы: д.ф.-м.н. в.н.с. Сергей Анатольевич Гриб, ГАО РАН, e-mail: sagrib@gmail.com

Состав группы: в.н.с. д.ф.м.н.ГАО РАН С.А.Гриб, доцент СПбГУ к.ф.м.н. С.Н.Леора, аспирант МГИУ Д.В.Донской.

#### Публикации:

1. С.А.Гриб, С.Н.Леора. Особенности поведения МГД волн солнечного ветра в магнитослое. XIX Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца 5-9 октября 2015 года «Солнечная и солнечно-земная физика 2015». Тезисы докладов, СПб, ГАО (Пулково), 2015, с.21-22.

2. *С.А.Гриб, С.Н.Леора*. Магнитная дыра как плазменная неоднородность в солнечном ветре и связанные с ней возмущения межпланетой среды. Геом. и Аэр., 2015, т.55, №2, с.168-175.

3. *S.A.Grib, S.N.Leora*. Features of the Behavior of Some Magnetohydrodynamic Structures in the Interplanetary Space. Geom. and Aeronomy, v. 55, No. 7, pp. 926-930, 2015.

С.А.Гриб, С.Н.Леора. Применение точных решений магнитной гидродинамики к описанию различных структурных возмущений в солнечном ветре. Геом. и Аэрономия, 2016, т.56, №2, с.1-16 (в печати).

4. *С.А.Гриб, С.Н.Леора.* Особенности поведения МГД волн солнечного ветра в магнитослое. XIX Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика 2015», Труды. СПб, ГАО (Пулково), 2015, 6 стр. (в печати).

## Проект 2.15. Эруптивные явления на Солнце и их роль в формировании космической погоды.

#### Тема 2.15.1. Особенности солнечных волокон в магнитном поле.

Сопоставление формы солнечных волокон с проекцией участков нейтральной поверхности потенциального магнитного поля короны в определенном интервале высот показало, что вещество волокон концентрируется в основном вблизи нейтральной поверхности потенциального поля. Сечения нейтральной поверхности горизонтальной плоскостью служат линиями раздела полярностей (ЛРП) вертикального поля на данной высоте. В проекции на диск, нижний край волокна с выступающими по бокам промежуточными "ножками" (barbs) обрисовывается ЛРП на малой высоте, а верхний край касается высокой ЛРП. Все вещество волокна заключено в пространстве между этими двумя линиями. Эту корреляцию можно использовать для определения высоты верхнего края волокон над фотосферой при наблюдениях только на диске. Примеры, в которых волокна наблюдались одновременно аппаратами STEREO в ортогональной проекции как протуберанцы на лимбе, показывают вполне удовлетворительную точность такого метода.

#### Публикации:

1. Filippov B., Filament Shape Versus Coronal Potential Magnetic Field Structure, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2015

2. Филиппов Б. П., Способ определения высоты солнечных волокон на диске, Геомагнетизм и аэрономия, **56**, № 1, 2016.

#### Тема 2.15.2. Оценка рентгеновского балла солнечных вспышек.

Разработан простой способ оценки рентгеновского балла солнечных залимбовых вспышек, наблюдаемых на КА STEREO-А и В. При солнечных вспышках рентгеновских классов С и выше на изображениях телескопа STEREO/EUVI в канале 195 Å возникает эффект перегрузки – полоска насыщения, ориентированная под небольшим углом к направлению восток-запад. Максимальная длина этой артефактной полоски (L) может быть использована для решения актуальной проблемы – оценок потока мягкого рентгеновского излучения и соответствующего балла вспышек, невидимых с Земли, но наблюдаемых с аппаратов STEREO (рис. 1).



Рис.1. Изображения телескопа STEREO/EUVI в канале 195 Å с полосой блумина, типичной для вспышек балла C(a), M(b) и X(c). Масштаб, показанный напанели (c) одинаков для всех трёх кадров.

С этой целью по данным о 350 вспышках балла С1 и выше, наблюдавшихся на ИСЗ GOES и KA STEREO с января 2007 г. по июль 2014 г., установлена статистическая зависимость между пиковым рентгеновским потоком в диапазоне 1–8 Å и максимальной относительной длиной полоски блуминга L/Rs, которая позволяет оценить балл залимбовых вспышек (рис. 2). Установленная зависимость позволила выделить 65 крупных залимбовых вспышек с L/Rs > 0.2 (т.е. с баллом >M3.0), наблюдавшихся только на STEREO, и оценить их рентгеновский класс. Согласно этим оценкам, наиболее мощной в 24-ом цикле была вспышка, произошедшая 20 сентября 2012 г. в активной области с координатами S15E156.



Рис. 2. Соотношение между максимальной относительной длиной полосы блуминга L/Rs по наблюдениям на ультрафиолетовых телескопах STEREO/EUVI в канале 195 Å и рентгеновским потоком GOES в диапазоне 1–8 Å. Светлые и тёмные кружки относятся, соответственно, ко вспышкам балла С и ≥М.

#### Публикация:

Chertok I.M., Belov A.V., Grechnev V.V. A Simple Way to Estimate the Soft X-ray Class of Far-Side Solar Flares Observed with STEREO/EUVI. *Solar Phys.* Volume 290, Issue 7, pp. 1947-1961, 2015. DOI: 10.1007/s11207-015-0738-4. <u>http://arxiv.org/pdf/1505.01649v2.pdf</u>

#### Тема 2.15.3. Поведение плотности космических лучей в магнитном облаке у Земли.

Показано, что в большинстве случаев поведение плотности космических лучей в магнитном облаке у Земли можно описывать простой параболической зависимостью от расстояния от центра магнитного облака, измеренного в гирорадиусах. Как правило, в магнитном облаке плотность космических лучей уменьшается, но есть группа событий (приблизительно 1/5 часть) в которых в магнитном облаке плотность космических лучей возрастает. В значительной части событий изменения плотности КЛ внутри магнитного облака дают почти симметричную картину, с минимумом плотности у центра облака, позволяя предполагать его квазицилиндрическую структуру. Достаточно часты также события, в которых поведение плотности КЛ, оставаясь регулярным, становится более сложным, с чередованием областей с повышенной и пониженной плотностью. Это может быть проявлением квазитороидальной структуры некоторых магнитных облаков.

#### Публикации:

1. Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E., Oleneva V., Yanke V., Papaioannou A., Mavromichalaki H., "Galactic Cosmic Ray Density Variations in Magnetic Clouds", Solar Physics, April 2015, doi: 10.1007/s11207-015-0678-z. |<u>Abstract</u>| <u>Apdf</u>|R<sup>G</sup>| <u>LIBRARY</u> |arXiv| IOPscience|NASA ADS|

2. Белов А., Абунин А., Абунина М., Ерошенко Е., Янке В. Папаиоанноу А., Мавромичалаки Е, "Вариации плотности галактических космических лучей в магнитных облаках" Геомагнетизм и аэрономия, T.55, No4, P.445-456, 2015. doi: 10.7868/S0016794015040021 Abstract |  $\succeq$  pdf(M) |  $\underline{\mathbb{R}^{G}}$  | Сивтаху |NASA ADS|

3. Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г., "Моделирование поведения плотности космических лучей в магнитных облаках", Известия РАН., сер. физ., Т. 79, № 5, с. 691–693, 2015. doi: 10.7868/S0367676515050166 |Abstract| 2pdf(M)|R<sup>G</sup>| Сцикаху |NASA ADS|

Руководители проекта: В.В.Фомичев, А.В.Белов (ИЗМИРАН).

Состав группы: Черток И.М., Чернов Г.П., Горгуца Р.В., Ковалев В.А., Филиппов Б.П., Платов Ю.В., О Ен Ден, Янке В.Г., Ерошенко Е.Г., Гущина Р.Т., Абунин А.А., Абунина М.А., Оленева В.А.

## Проект 2.16. Физические процессы в атмосфере Солнца: плазменные неустойчивости, МГД-волны, нагрев плазмы и электромагнитное излучение. Тема 2.16.1. Ускорение частиц и нагрев плазмы в хромосфере Солнца

Предложен механизм ускорения частиц и нагрева хромосферы *in sutu*, на основе неустойчивости Рэлея-Тейлора в магнитном поле. Неустойчивость развивается в хромосферных основаниях корональных магнитных арок и деформирует магнитное поле. Электрический ток в арке меняется и появляется индукционное электрическое поле. Импульс электрического поля вместе с импульсом электрического тока распространяется вверх с альфвеновской скоростью и ускоряет электроны до энергии ~ 1 МэВ. Ускоренные электроны термализуются в плотной плазме с n  $\geq 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, нагревая её до T  $\geq 10^6$  К. Джоулева диссипация импульса электрического тока нагревает слои хромосферы, соответствующие n  $\approx 10^{11}$ - $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. При токе  $\geq 10^{11}$  А электрическое поле на фронте импульса превышает поле Драйсера.

#### Публикация:

Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Particle Acceleration and Plasma Heating in the Chromosphere // Solar Physics, **290**, No 8, (2015) doi 10.1007/s11207-015-0731-y

# Тема 2.16.2. Определение характера анизотропии ускоренных электронов по распределению круговой поляризации микроволнового излучения во вспышечной петле.

**Аннотация.** Обнаружено явление пространственной и временной инверсии знака степени поляризации микроволнового излучения, связанное с появлением во вспышечной петле источника излучения, поляризованного в обыкновенной моде. Установлено, что обнаруженное явление обусловлено формированием продольной анизотропии нетепловых электронов в верхней части вспышечной петли.

Объектом исследования является вспышка 19 июля 2012 г. Обнаружена инверсия знака круговой поляризации вдоль вспышечной петли, а также изменение знака со временем в отдельных частях петли в ходе всплеска. Наиболее интересно то, что в верхней части петли появляется источник излучения, поляризованный в обыкновенной моде. Инверсия поляризации такого типа ранее не отмечалась в других вспышечных событиях ([Y. N. Su and G. L. Huang, 2003], [Altyntsev et. al., 2008]).

Появление излучения, поляризованного в обыкновенной моде, является крайне интересным, так как может быть результатом эффектов, важных для теории ускорения, таких как: 1) наличие больших потоков позитронов во вспышке (Fleishman, Altyntsev, Meshalkina. // PASJ 2013, 65, S7); 2) наличие продольной анизотропии ускоренных электронов (Melnikov, Pyatakov, Shibasaki. // ASPC, 2012, 454, 321).

Для объяснения поляризации проведено моделирование кинетики нетепловых электронов и расчет их радиоизлучения для магнитной петли с параметрами, полученными на основе наблюдений и радиодиагностики [Morgachev et al. 2015]]. Моделирование кинетики электронов в магнитной ловушке проведено на основе решения нестационарного кинетического уравнения Фоккера-Планка, включающего функцию инжекции электронов и описывающего эффекты магнитного отражения и высыпания частиц, а также кулоновского рассеяния на фоновой плазме [Горбиков и Мельников, 2007]. Используя полученную функцию распределения электронов по энергиям, питч-углам, расстоянию вдоль петли и времени, произведен расчет характеристик их гиросинхротронного ( $\Gamma C$ ) излучения, используя методику и набор программ, описанных в работе [Simões & Costa, 2010]. Рассмотрено шесть основных моделей инжекции электронов в магнитную петлю (квазипродольная, квазипоперечная и изотропная инжекции в вершине или одном из оснований петли). В результате исследования установлено, что моделями с подходящими пространственными и временными распределениями характеристик ГС излучения являются модели квазипродольной инжекции электронов в вершине петли и изотропной инжекции в одном из оснований. Данная модель характеризуется формированием в процессе вспышки продольной питч-угловой анизотропии электронов в вершине петли. Таким образом, наблюдаемая смена знака поляризации в событии 19 июля 2012 вызвана появлением продольной анизотропии ускоренных электронов в верхней части вспышечной петли, а не потоками позитронов.



Рис. 1. Карта распределения степени поляризации на частоте 17 ГГц по вспышечной петле для события 19 июля 2012 г. в момент времени 05:24:30 UT. (слева) и карта распределения степени поляризации в модельной вспышечной петле для модели с изотропной инжекцией электронов вблизи основания петли для момента времени t=9cek. В наблюдаемой и модельной магнитных петлях области вблизи оснований поляризованы в необыкновенной моде, а области в верхней части петли – в обыкновенной моде.

#### Публикации:

 A.S. Morgachev, S. A. Kuznetsov, V. F. Melnikov, and J. A. Simões. "Modeling the Distribution of Circular Polarization Degree of Microwave Emission along the Flare Loops in Event July 19, 2012." // Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 8, pp. 1118-1123.
Кузнецов С.А., Моргачев А.С., Мельников В.Ф. "Анализ распределения степени поляризации вдоль солнечных вспышечных петель в событии 19 июля 2012 года" // Сборник тезисов десятой ежегодная конференция "Физика плазмы в Солнечной системе», 2015, ИКИ РАН, Москва, с. 33

3. A.S. Morgachev, S.A. Kuznetsov, and V.F. Melnikov "Radio Diagnostics of the Solar Flaring Loop Parameters by Direct Fitting Method. // Geomagnetism and Aeronomy, 2014, Vol. 54, №7, pp. 933–942.

4. Melnikov V.F., Pyatakov N.P., Shibasaki K. "Constraints for electron acceleration models in solar flares from microwave observations with high spatial resolution." // ASPC, 2012, V.454, P.321-324.

## Тема 2.16.3. Тепловой тормозной механизм генерации суб-ТГц излучения солнечной вспышки.

Впервые обнаружен рост спектра суб-ТГц излучения солнечных вспышек в ранее неисследованном диапазоне 90-200 ГГц по данным радиотелескопа МГТУ им. Баумана РТ-7.5 в событии 4 июля 2012. Предложен тепловой тормозной механизм генерации суб-ТГц излучения оптически толстой хромосферной плазмы в данном событии на основе мультиволновых данных наблюдений в радио, оптическом, ультрафиолетовом, рентгеновском диапазонах и теоретического моделирования радиоизлучения.

#### Публикации:

1. A. Morgachev, Y. Tsap, V. Smirnova, G. Motorina, E. Kontar, V. Nagnibeda, P. Strekalova "On the origin of the sub-THz emission from the 4 July 2012 solar flare" // The XIII Russian-Finnish Symposium on Radio Astronomy "Multi-Wavelength Study of Stellar Flares and the propertien of Active Galactic Nuclei", May 25-29, 2015, Saint Petersburg, Russia, p. 16 2. Yuriy T. Tsap, Viktoria V. Smirnova, Alexander S. Morgachev, Galina G. Motorina, Eduard P. Kontar, Valery G. Nagnibeda "On the origin of the sub-THz emission from the 4 July 2012 solar flare" // Advances in Space Research, 2015 (accepted)

#### Тема 2.16.4. Признаки подготовки больших вспышек.

Аннотация. На ряде конкретных эруптивных событий на Солнце выявлены признаки подготовки больших вспышек (классов >M5.0 и Х), проявляющиеся одновременно в микроволновом диапазоне и магнитографических характеристиках активной области, в частности, синхронный рост градиента магнитного поля и интенсивности микроволнового источника над областью максимального градиента магнитного поля в течение нескольких дней перед вспышкой.

Исследование динамики микроволнового излучения выбранных активных областей выполнялось на основе ежедневных многоазимутальных многоволновых спектральнополяризационных наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 в диапазоне 1.6 – 6.0 см. Магнитографический анализ проводился по данным, полученным на космической обсерватории SDO/HMI. Основным критерием отбора АО была достаточная удаленность АО в момент вспышки от восточного лимба, чтобы можно было проследить эволюцию АО за несколько дней до вспышки. В работе были исследованы две АО NOAA 12017 и 12297, в которых произошли вспышки классов X1.0 29 марта 2014 г. и X2.1 11 марта 2015 г. соответственно.

Выявлены следующие признаки подготовки вспышек класса Х:

1) За двое суток до вспышек вблизи ранее существовавших пятен зарегистрировано всплытие магнитного поля противоположной полярности;

2) Перед вспышками отмечено резкое возрастание градиента магнитного поля в АО;

 Перед вспышками развился микроволновый источник над областью максимального градиента магнитного поля;

4) Эволюция развившихся микроволновых источников подобна эволюции градиента магнитного поля в АО в течение нескольких дней перед вспышкой (см. рис.1).

Полученные результаты важны для развития методов прогноза больших солнечных вспышек, в особенности геоэффективных, воздействующих на околоземное пространство и земную атмосферу.



Рис. 1. Сопоставление градиента магнитного поля АО NOAA 12017 и 12297, определенного из магнитографического анализа и антенных температур микроволнового источника, расположенного над максимальным градиентом магнитного поля (λ = 3.45 см), измеренных на РАТАН-600. Ось абсцисс – доли суток. Левые оси ординат – градиент магнитного поля, правые – антенная температура. Сплошными синими линиями показаны

антенные температуры микроволнового источника, соответствующие периодам наблюдений на РАТАН-600, штриховые синие линии соединяют фрагменты сплошных кривых. Красная линия показывает градиент магнитного поля. Моменты вспышек указаны вертикальными линиями: вспышки М-класса – штриховыми, Х-класса – сплошной.

#### Публикации:

1. V.E.Abramov-Maximov, V.N.Borovik, L.V.Opeikina, A.G.Tlatov. Dynamics of Microwave Sources Associated with the Neutral Line and the Magnetic-Field Parameters of Sunspots as a Factor in Predicting Large Flares. *Solar. Phys.*, **290**, 53-77, 2015. DOI 10.1007/s11207-014-0605-8

2. V.E.Abramov-Maximov,V.N.Borovik, L.V.Opeikina, A.G.Tlatov. Precursors of the Solar X Flare on March 29, 2014, in the Active Region NOAA 12017 Based on Microwave Radiation and Magnetographic Data. *Geomagnetism and Aeronomy*, **55**, №8, 1097-1103, 2015.DOI: 10.1134/S0016793215080022

#### Руководитель проекта: А.В.Степанов (ГАО РАН).

Состав группы: В.Ф.Мельников (ГАО РАН, НИРФИ), Ю.Т.Цап (КрАО, ГАО РАН), А.С.Моргачёв, С.А.Кузнецов (ГАО РАН, НИРФИ), В.Е.Абрамов-Максимов, В.Н.Боровик, В.В.Смирнова, Г.Г.Моторина (ГАО РАН).

Проект 2.17. Физика магнитосфер активных областей в переходной области хромосфера-корона и нижней короны Солнца по микроволновым наблюдениям. Тема 2.17.1. Автоматизированный метод диагностического моделирования атмосферы Солнца.

Аннотация. Разработан метод диагностического моделирования, который позволяет построить адекватную модель изменения электронной температуры и плотности с высотой для наблюдаемого солнечного микроволнового источника с преобладающим циклотронным излучением.

Были использованы многоволновые спектрально-поляризационные наблюдения на РАТАН-600, на основе которых построены симметричные плоскопараллельные модели высотного изменения температуры и плотности электронов. Применен новый быстрый алгоритма решения уравнения переноса излучения, что позволило автоматизировать подбор высотных распределений температуры и плотности электронов.

**Метод**: для каждой частоты соответствующим образом меняется значение кинетической температуры на эффективной высоте излучения (2 и 3 гирорезонансных уровней обыкновенной и необыкновенной мод, при оптической плотности равной единице). Рост температуры и плотности электронов ищется в ходе итераций по критерию наилучшего

совпадения наблюдаемых на РАТАН-600 и расчетных максимумов интенсивности на сканах для всех 70-100 частот.

Аппробация метода: на основе экстраполированного магнитного поля проведены расчеты теплового тормозного и магнитотормозного микроволнового излучения пятна с большой площадью из АО 12209. Рассчитанная структура пятна с ее мелкими деталями соответствует двумерным картам, полученным на VLA. Полученная высотная модель согласуется с общепринятыми представлениями, уточняя высотный рост температуры в переходной зоне.



Рис. 1. Слева – силовые линии экстраполированного магнитного поля, наложенные на магнитограмму НМІ. Справа – расчетные карты яркостных температур (верхний ряд) и эффективных высот излучения (нижний ряд) для двух мод излучения, частота 8.4 ГГц.



Рис. 2. а) сравнение расчетного и наблюденного сканов на одной из частот; b) минимизация разности между наблюденными и расчетными сканами в ходе 10 итераций,

для каждой итерации показаны значения амплитуды скана на 71 частоте; с) полученное в результате диагностического моделирования изменение температуры и плотности электронов с высотой в переходной зоне над пятном.

Заключение. Примененный метод диагностического моделирования позволяет построить адекватную модель изменения электронной температуры и плотности с высотой для наблюдаемого микроволнового источника с преобладающим циклотронным излучением. Совместные наблюдения на РАТАН-600 и VLA позволили получить более подробное представление о структуре активной области, характеристиках ее малых (пятенных) и больших (флоккульных) компонент разной физической природы и механизмов излучения, а также о динамике изменения этих характеристик.

#### Руководитель проекта: В.М.Богод (САО РАН).

Состав группы: Кальтман Т.И., Тохчукова С.Х., Курочкин Е.А., Шендрик А.В. (САО РАН), Ступишин А.Г., Яснов Л.В. (СПбГУ)

Подготовлена публикация в Astrophysical Journal: *The Structure of Active Region NOAA 12209 using Microwave Observations at RATAN-600 and VLA//* Кальтман Т.И., Бастиан Т.С., Богод В.М., Гэри Д.Е., Тохчукова С. Х., Уайт С. М., Флейшман Г. Д., Яснов Л.В., Ступишин А.Г., Чен Б.

## Проект 2.18. Ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы в нестационарных процессах на Солнце и новые физические модели активных образований.

**Аннотация.** Предложена трехпотоковая структура магнитного поля солнечного пятна, позволяющая объяснить формирование межпятенных радиоисточников, а также дать адекватное аналитическое описание наблюдаемых слоев солнечного пятна.

Типичная магнитная структура одиночного униполярного круглого пятна с достаточно развитой полутенью показана на рисунке. Поток магнитного поля, выходящий из пятна, делится на 2 части. Первая, А1 – поток поля, уходящий из пятна наверх, в корону и замыкающийся вдалеке, через верхние слои солнечной короны на пятно (или на несколько пятен и пор) противоположной полярности. Вторая часть, А2 – магнитный поток, который формирует относительно тонкий слой полутени пятна, где существуют радиально

истекающие из пятна течения Эвершеда, несущие в себе достаточно плотную фотосферную плазму, которая не может быть поднята в корону. По этой причине магнитные силовые линии потока А2 сильно прижаты к поверхности Солнца и на внешней границе полутени они замыкаются на фотосферу в непосредственной близости от пятна, так что вертикальная составляющая поля А2 здесь меняет свой знак. Кроме того, в окрестности пятна в активной области всегда есть внешнее по отношению к пятну магнитное поле А3, которое имеет ту же полярность, что и поле в пятне, но напряженность его значительно слабее (около 300-500 Гс). В тех точках вблизи внешнего края полутени, где поток поля, выходящий из пятна, раздваивается на A1, уходящий вверх, и А2, уходящий вниз, возникает особая линия, образующая верхний край сепаратрисной поверхности между магнитными потоками А2 и А3, которые по разные стороны от этой поверхности имеют противоположной полярности (см. рисунок). На этой сепаратрисной поверхности неизбежно возникают магнитные пересоединения, здесь формируются множественные мелкомасштабные токовые слои, в которых плазма греется за счет выделения магнитной энергии (отсюда возникают многочисленные яркие точки вокруг пятна, известный пояс повышенной яркости), но нагрев этот слабый, поскольку плотность плазмы здесь относительно велика (альвеновская скорость мала). В этих магнитных пересоединениях, как бы малы и слабы они ни были, обязательно возникают субдрейсеровские и дрейсеровские поля электрические поля и, соответственно, ускоренные частицы, главным образом, электроны. Их относительно немного, но они постоянно присутствуют в области указанной сепаратрисы. Важно подчеркнуть, что вследствие динамической природы полутени солнечного пятна магнитные пересоединения на ее внешнем краю носят случайный стохастический характер: магнитное поле в полутени крайне неоднородно, резко фрагментировано, вдоль тонких магнитных волокон текут радиально направленные от пятна струи течений Эвершеда со скоростями в несколько км/с. Эти множественные магнитоплазменные струи в полутени пятна, как показывают современные космические наблюдения, постоянно меняют форму, перемешиваются и перекрещиваются. Все это ведет к тому, что в области указанной сепаратрисы формируются мелко- и мультимасштабные токовые слои, время жизни каждого из которых невелико – несколько минут, они возникают и быстро исчезают, но важно, что какое-то их число существует постоянно, поскольку в силу общей крупномасштабной геометрии системы здесь, у внешней границы полутени, где замыкаются на фотосферу тяжелые течения Эвершеда, сталкиваются магнитные поля противоположной полярности. Множественные токовые слои порождают вокруг

солнечного пятна определенный фон ускоренных частиц. Эти частицы, распространяясь вдоль магнитных силовых линий должны накапливаться, как в ловушках, в вершинах магнитных петель, имеющих основания вблизи областей магнитных пересоединений. Естественно предположить при этом, что в чем более низкие петли попадают ускоренные частицы, тем больше должна быть их энергия, поскольку в основаниях низких магнитных петель, берущих начало в области пересоединений, магнитное поле заметно больше и, соответственно, при магнитных пересоединениях здесь генерируются более сильные электрические поля. Следуя этой логике, можно ожидать, что низколежащие петли в окрестности пятен могут быть разогреты за счет термализации попавших в них ускоренных частиц до бОльших температур, чем более высокие петли с меньшим магнитным полем, заполняемые менее энергичными частицами. Надо заметить, что хотя в нижележащих петлях плотность плазмы выше, чем в высоких, но в силу того, что их длина значительно меньше, общее число частиц, на которых термализуются нетепловые электроны, примерно такое же, как в высоких, поэтому решающим фактором для разогрева плазмы является энергия и количество ускоренных частиц, захваченных в той или иной петле. Это простое предположение подтверждается данными космической обсерватории *HINODE* (Tun et al. 2011, see herein Fig. 18), которые показывают, что тонкие магнитные петли, наблюдаемые вблизи пятен в рентгеновском диапазоне, располагаются систематически ниже, чем петли, генерирующие тепловое и гиросинхротронное микроволновое излучение. По-видимому, в случае полной термализации ускоренных частиц в петле возникает тепловое радиоизлучение, а в случае их частичной термализации – гиросинхротронное. Данные, приведенные в цитированной работе, представляются нам важным наблюдательным подтверждением высказанных выше общих качественных соображений о структуре магнитного поля пятна в целом и механизме появления магнитных петель, выделяющихся на общем фоне повышенным излучением не только в радиодиапазоне, но и в рентгене.



Магнитная структура солнечного пятна: потоки A1, A2 и A3. Толстый пунктир – сепаратриса между A2 и A3. Тонкие штрих-пунктирные стрелки – направления движения заряженных частиц, ускоренных в области магнитных пересоединений. Частицы, идущие к центру пятна, дают обратный эффект Эвершеда в хромосфере, идущие от пятна – формируют межпятенные радиоисточники в вершинах коротких и низких магнитных петель, соединяющих пятна противоположной полярности. Шкала высот в пятне сдвинута от фотосферы вниз на 500 км, на глубину Вильсоновской депрессии:  $h = \zeta$ .

#### Руководитель проекта: А.А.Соловьёв (ГАО РАН).

Состав группы: Ефремов В.И., Парфиненко Л.Д., Смирнова В.В., Киричек Е.А., Живанович И., Королькова (ГАО РАН)

#### Публикации:

1. Bakunina I.A, Melnikov V.F., Solov'ev A.A, Abramov-Maksimov V.E. // Interspot microwave sources. *Solar Physics* (2015). Vol. **290**, №1, pp. 37-52.

2. Murawski K., Solov'ev A., Musielak Z.E., Srivastava A.K., Kraskiewicz J. // Torsional Alfven waves in solar magnetic flux tubes of axial Symmetry. *Astronomy and Astrophysics* Vol. **577**, A126 (11), 2015.

3. Murawski K., Solov'ev A., Kraskiewicz J., New analytical and numerical models of a solar coronal loop. I. Application to forced vertical kink oscillations// *Astronomy and Astrophysics*. Vol. **576**, A22 (6), (**2015**)

4. Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A. // Identification of large-scale cellular structures on the Sun based on the SDO and PSPT data. *Astrophysics and Space Science*. **356**, №1, pp.1-6. (2015).
5. V.V. Smirnova, A. Riehokainen, A.A. Solov'ev, J. Kallunki. // Time-delays between long quasi-periodic oscillations of 37 GHz radio sources and the magnetic field of the nearest sunspots. *Astrophysics and Space Science* Vol.**357**.No.2, pp.149-156. 2015.

6. Kuzma B., Murawsky K., Solov'ev A.A. // Numerical simulations of sheared magnetic lines at the solar null-point. *Astronomy and Astrophysics* . vol. **577**, A138, (8), 2015.

7. Murawski K., Solov'ev A., Kraskiewicz J. "A numerical model of MHD waves in a 3D twisted solar flux-tube". *Solar Physics* Vol. **290**, Issue 7, pp.1909-1922 2015.

8. Соловьев А.А., Киричек Е.А. Магнитогидростатика вертикальной силовой трубки в солнечной атмосфере: корональные петли, модель кольцевого вспышечного волокна.

*Письма в астрономический журнал* том **41**, No.5, cc. 234-247 (2015). (*Astronomy Letters*, vol.**41**, no.5, pp. 211-224. 2015).

9. A.A. Solov'ev, V.I. Efremov, L.D. Parfinenko & E.A. Kirichek. Large Convective Cells in the Sun: a Theoretical Model. *Geomagnetism & Aeronomy* vol. 55, no.8. PP.1054-1059 (2015).
10. A.A. Solov'ev. Sunspot Magnetic Structure and Interspot Radio Sources Formation. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. 55 no.7, pp.,856-859 (2015).

11. V.V. Smirnova, A.A. Solov'ev A.A., A. Riechokainen & J. Kallunki. Modulation of radio source emission by long-period oscillations of a nearby sunspot. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol. **55.** no.7. PP. 991-994. (2015).

# Проект. Диагностика динамики фотосферных магнитных полей методами современной теории случайных полей

Аннотация. Разработаны методы диагностики предвелышечной динамики магнитных полей АО средствами вычислительной топологии и дифференциальной геометрии.

Проект посвящен разработке мультимасштабных подходов для извлечения и анализа геометрических, топологических и скейлинговых характеристик наблюдаемых полей из цифровых изображений. Основная идея состоит в построении фильтрации, т.е. использовании последовательности вложенных друг в друга моделей. Сами модели представляют собой симплициальные комплексы – комбинаторные структуры, построенные на отсчетах изображения относительно выбранной меры близости. Они аппроксимируют паттерн с различной детальностью, и допускают инвариантные топологические дескрипторы для каждого шага фильтрации. Этот подход обобщает и дополняет морфологическую фильтрацию на геометрии множеств выбросов [1,2]. «Время

жизни» каждого дескриптора, компоненты связности или «дыры», измеренное длиной субинтервалов, на которых он существует, позволяет ввести «персистентность» характеристики. Мы использовали упомянутый подход для диагностики и моделирования фотосферных полей в АО и фонового поля, сравнивая полученные дескрипторы с аналогами численных моделей гауссовских и логнормальных полей.

Необходимый математический формализм, который лежит в основе алгоритма изложен в работах [3,4]. Фильтрация реализуется сканированием топографии магнитограммы (т.е. 2D поверхности, вложенной в 3D) плоскостью ортогональной нормали к носителю меры [5]. На каждом уровне может рождаться новая компонента связности, если она не является соседней, с уже существующей, которая появилась ниже нее. В противном случае она сливается с уже существующей компонентой. Могут возникать дыры, окруженные кольцом компонент связности. Количество компонент и дыр на каждом уровне измеряется числами Бетти b0 и b1, соответственно. Важно отметить, что появление и исчезновение компонент происходит в критических точках поля, на разных уровнях. Поэтому, числа Бетти полностью характеризуют структуру экстремумов на различных сечениях, а разность b0-b1 равна характеристике Эйлера.



Рис. 1. Распределение чисел Бетти0 и Бетти1 для фрагмента АО.

В качестве иллюстрации, на рис. 1 и 2 приведены кривые чисел Бетти фрагмента активной области и фонового поля, соответственно. Хвосты распределения на рис.1 связаны с большими значениями поля в пятнах, которые обеспечивают персистентные значения b0 и b1.



Рис. 2. Распределение чисел Бетти0 и Бетти1 для фрагмента фонового поля.

Мы тестировали топологические дескрипторы на небольшой выборке вспышечных АО, сравнивая их с традиционными дескрипторами [6]. Основной, нерешенной пока проблемой является калибровка чисел Бетти для изображений разного размера. Очевидно, что основной вклад в компоненты связности в окрестности нуля дает фон (см. рис. 1, 2). Поэтому, мы пытались выявить предвспышечный режим по соотношению максимумов чисел b0 и b1. Известно, что первое из них определяет плотность максимумов и минимумов поля, а второе – плотность седловых точек [3]. Так что разница между ними измеряет степень «негауссовости» поля: для последнего они совпадают. В качестве иллюстрации, на рис. 3, 4 приведены распределения топологических дескрипторов для двух вспышечных областей. Для сравнения, на рис. 5 приведены результаты для области, которая не дала сильных вспышек.



Рис. 3. Распределения максимумов чисел Бетти в окрестности нуля для AO 11158 за 24<sup>h</sup> до вспышки X2.2. Максимум b1 превышает максимум b0.



Рис. 4. Распределения максимумов чисел Бетти в окрестности нуля для AO 11890 за 24<sup>h</sup> до вспышки X3.3. Максимум b1 превышает максимум b0.



Рис. 5. Распределения максимумов чисел Бетти в окрестности нуля для AO 12014 без сильных вспышек (>M1). Максимум b0 превышает максимум b1.

Мы собираемся проверить эти и некоторые другие топологические дескрипторы на выборках большого объема.

#### Литература:

1. Макаренко Н.Г., Князева И.С., Каримова Л.М.. Топология магнитных областей по MDI данным: активные области // Письма в Астрономический журнал, 2012, Т. 38, №8, с. 597–608

2. Князева И.С., Макаренко Н.Г. Эволюция магнитного поля вспышечно-активных областей солнца из геометрии и топологии HMI/SDO-магнитограмм// Астрономический журнал, 2014. Т.91. №3. С. 200-210.

R.J.Adler, Taylor J. E. Topological Complexity of Smooth Random Functions, Springer.
 2011.

H. Edelsbrunner, J.L.~Harer. Computational Topology. Introduction. Amer. Math. Soc. Providence, Rhode Island, 2010.

 Макаренко Н. Г., Малкова Д. Б., Мячин М. Л., Князева И. С., Макаренко И. Н. Диагностика магнитной динамики активных областей Солнца методами вычислительной топологии // Фундамент. и прикл. матем., 2013, Т. 18, выпуск 2, С. 79–93
 I.S.Kniazeva, N.G.Makarenko, F.A. Urtiev. The dynamical regime of Active Regions via the

concept of persistent homology. Physics Procedia, Vol 74C, pp. 363-367 (2015), doi:10.1016/j.phpro.2015.09.194

Руководитель проекта: Макаренко Н.Г. ГАО РАН. <u>ng-makar@mail.ru</u>

**Состав группы:** Князева И.С., ГАО РАН, iknyazeva@gmail.com; Волобуев Д.М., ГАО РАН, <u>dmitry.volobuev@mail.ru</u>; Уртьев Ф.А., ГАО РАН, urtiev@gmail.com

#### Публикации:

1. I.S.Kniazeva, N.G.Makarenko, F.A. Urtiev. The dynamical regime of Active Regions via the concept of persistent homology. Physics Procedia, Vol 74C, pp. 363-367 (2015), doi:10.1016/j.phpro.2015.09.194

2. I.S.Kniazeva, N.G.Makarenko, F.A. Urtiev. Comparison of the Dynamics of Active Regions by Methods of Computational Topology. Geomagnetism and Aeronomy, 2015, Vol. 55, No. 8, pp. 1–7.

3. Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г. Динамическая связь активности в Северном и Южном полушариях Солнца. //Солнечная и Солнечно-земная физика, Труды 2015. С.59-62

Volobuev D. M., Makarenko N. G. Radiocarbon Version of 11\_Year Variations in the Interplanetary Magnetic Field Since 1250, *//Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 55, No. 7, 2015, pp 938-945

4. Волобуев Д.М., Макаренко Н.Г., Князева И.С. Эволюция Лапласиана Бохнера для магнитограмм активных областей Солнца.//Солнечная и Солнечно-земная физика, Труды 2015. С.63-66.

Результаты исследования были доложены на нескольких международных и всероссийских конференциях.

#### Доклады:

1. Макаренко Н.Г. Обучение гомологиям из облака точек. Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2015. ИПФ, Нижний Новгород, 21-25 сентябрь (Лекция)

2. Макаренко Н.Г. Статистическая топология, персистентные ландшафты и случайные поля. (Лекция) Нейроинформатика-2015. XVII Всероссийская научно

техническая конференция с международным участием. НИЯУ МИФИ, 19-23 январь (Лекция)

3. N. Makarenko, Geometry and topology of digital images. Dynamics, Topology and Computations. Bedlewo, Poland, June 15 - 20, (Invited speakers)

4. Д.Волобуев, Н.Макаренко Динамическая связь активности в северном и южном полушариях Солнца. Солнечная и солнечно-земная физика -2015, 5-9 октябрь, ГАО.

5. Д.Волобуев, Н.Макаренко, И.Князева Эволюция лапласиана Бохнера для магнитограмм активных областей Солнца Солнечная и сонечно-земная физика -2015, 5-9 октябрь, ГАО

 Н.Макаренко, Д.Пак, В.Алексеев Редактирование магнитограмм Активных Областей методами дискретной теории Морса Солнечная и сонечно-земная физика -2015, 5-9 октябрь, ГАО

7. Н.Макаренко, И.Преображенский, В.Алексеев Большие диффеоморфизмы магнитограмм и эволюционные модели АО Солнечная и сонечно-земная физика -2015, 5-9 октябрь, ГАО

## Проект. Доказательство ускорения солнечных космических лучей во вспышечном токовом слое и механизм их распространения в межпланетной среде.

Около 30% больших вспышек (класса Х и еще реже класса М) сопровождается потоком релятивистских протонов. Часть протонов попадает на Солнце и вызывает ядерные реакции, а другая часть распространяется в межпланетной среде. Несмотря на многолетние усилия, релятивистские вспышечные протоны продолжают оставаться наименее изученным проявлением вспышки. Энергия заряженной частицы В межпланетной плазме может изменяться только за счет излучения или ее движения вдоль электрического поля  $MdV/dt = eE + e[V \times B]/c$ . Электрическое поле может быть различного происхождения: поле другой заряженной частицы (при столкновении), поле объемного заряда, в частности из-за поляризации зарядов в плазме, поле индукции dB/dt и т. д. При рассеянии на неоднородностях магнитного поля частица может изменить энергию только за счет движения в электрическом поле, связанном с этой флуктуацией магнитного поля. Это четко сформулировано в известной работе Бережко и Крымского (УФН 154, 49 1988). "Возможность ускорения заряженных частиц в плазме связана с имеющимися в ней электрическими полями". Изменение энергии при рассеянии на магнитной флуктуации

определяется величиной и пространственным масштабом электрического поля в этой флуктуации.

В литературе обсуждается две возможности генерации солнечных космических лучей: a). Ускорение в поле Лоренца  $E_{rec} = -V_{rec} \times B_{cs}/c$  вдоль особой линии (в частности линии B=0) в токовом слое при магнитном пересоединении.

b). Ускорение Ферми, т. е. также ускорение электрическим полем Лоренца  $E_{shock} = -V_{shock} \times B_{shock}/c$ , но внутри фронта ударной волны или во флуктуации магнитного поля. Здесь  $V_{rec}$  – скорость пересоединения,  $B_{cs}$  – магнитное поле распадающегося токового слоя,  $V_{shock}$  и  $B_{shock}$ -скорость и магнитное поле фронта ударной волны.

Максимальная энергия протонов при ускорении в токовом слое солнечной вспышки может быть оценена следующим образом. При скорости пересоединения  $V_{rec} = 2 \times 10^7$  см/с, поле токового слоя  $B_{cs} = 100$  Г и длине слоя  $L = 10^9$  см максимальная энергия протонов, ускоренных в токовом слое, может быть оценена, как  $W = L V_{rec}B_{cs}/c \sim 20$  ГэВ, что соответствует максимальной энергии протонов, измеряемой при вспышке на нейтронных мониторах (Балабин и др. АЖ **82**, 940 2005)

Большие потоки солнечных космических лучей. Только часть вспышек класса X (~30%) и некоторые вспышки класса M сопровождаются большими  $\Phi \ge 1 \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ стер}^{-1}$  потоками релятивистских протонов на орбите Земли. Спектр потока протонов простирается до 20 ГэВ [6, 7]. Средняя длительность импульса протонов составляет 3 суток, в то время как длительность вспышки, определенная по мягкому и жесткому рентгеновским излучениям, обычно составляет 20-30 мин. Такая же длительность наблюдается и для импульсов  $\gamma$ -излучения (в основном 2.222 МэВ) ядерных реакций, происходящих на Солнце при попадании на него ускоренных протонов. Т. е. длительность излучения протонов не может сколько-нибудь значительно отличаться от длительности вспышки. В работе Tan et al. (ApJ **750**, 146, 2012) большая длительность регистрируемого на орбите Земли потока протонов объясняется их существованием в солнечном ветре с магнитными ловушками. Рассматривается как удержание частиц в адиабатических ловушках, так и отражение от ударных волн.

Анализ измерений на аппаратах GOES показывает, что параметры потока релятивистских протонов на орбите Земли зависят от положения вспышки, давшей поток протонов, на диске Солнца. Типичные примеры регистрации одиночных больших потоков протонов показаны на рис. 1.



Рис. 1. Вверху, а) Рентгеновское излучение от Западной протонной вспышки. б) Рентгеновское излучение от Восточной протонной вспышки. Внизу - типичные большие потоки протонов от этих вспышек по данным аппарата GOES.

Поток протонов от вспышки, происшедшей на Западе Солнца, имеет крутой фронт длительностью около 10 – 15 мин. Поток от такой вспышки приходит к Земле с задержкой относительно начала вспышки около 30 мин. Т. е. задержка определяется временем пролета частицы от Солнца до Земли без столкновений. Вектор скорости частицы на фронте Западных вспышек, по-видимому, направлен вдоль линии магнитного поля. Длительность потока протонов составляет обычно ~3 суток. Она равна времени дрейфа протонов к Земле со скоростью солнечного ветра ( $V = 3 \times 10^7$  см/с). В конце протонного импульса, регистрируемого аппаратам GOES, приходят частицы, которые не попали на линию поля, соединяющую вспышку с Землей, и дрейфовали поперек поля. Они распространяются в межпланетной среде со скоростью солнечного ветра. Частицы, приходящие раньше, по-видимому, часть пути проходили вдоль поля, а часть дрейфовали поперек поля. Распространение протонов быстрее солнечного ветра могло иметь место изза диффузии поперек поля, за счет рассеяния на магнитных неоднородностях. В редких случаях форма протонного импульса от Западной вспышки отличается от события, приведенного на рис. 1а – происходит затягивание фронта. Иногда до нескольких часов. Это случается когда протонная вспышка произошла непосредственно после других больших вспышек и корональных выбросов, и имело место искажение спиральной структуры магнитного поля Земли. Уникальная серия, состоящая из 6 больших протонных событий (рис. 2), произошла в течение 10 дней с 27.10.2003 по 6.11.2003. По-видимому, межпланетное поле было сильно искажено, и длительность фронта протонного потока от гигантской Западной вспышки X19 составила 10 часов.



Рис. 2. Вверху - рентгеновское излучение от двух Западных протонных вспышек, зарегистрированных после серии больших вспышек. Внизу – второе протонное событие имеет необычно длительный ~10 часов для Западных вспышек фронт.

В отличие от протонов западных вспышек протоны от восточных начинают регистрироваться с запаздыванием относительно начала вспышки в несколько часов. Фронт потока протонов от Восточных вспышек никогда не бывает крутым, его длительность достигает суток (рис. 1б). Протоны от восточных вспышек не могут прийти к Земле вдоль линии спирали Архимеда. Они могут переноситься солнечным ветром и распространяться вследствие диффузии поперек магнитного поля из-за рассеяния на флуктуациях. Диффузия должна приводить к уширению регистрируемого фронта потока протонов. Сложные траектории частиц в межпланетной среде, приходящих к Земле от восточных вспышек, затрудняют перенос регистрируемых протонов, поэтому потоки быстрых протонов от восточных вспышек должны быть меньшими, чем потоки вдоль 108 линий магнитного поля от западных вспышек. Многолетние измерения приборами GOES показывают, что число зарегистрированных больших протонных событий от западных вспышек на порядок величины превышает число протонных событий от восточных вспышек. Это значит, что, дрейфуя поперек магнитного поля, протоны от восточных вспышек не всегда могут достичь околоземного пространства.

**Малые потоки солнечных космических лучей.** Малые потоки ускоренных протонов регистрируются примерно с такой же частотой, что и большие. В отличии от больших протонных событий ( $\Phi \ge 1 \text{ см}^{-2} \text{ c}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ ) малые потоки солнечных космических лучей ( $\Phi \le 1 \text{ см}^{-2} \text{ c}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ ) не обнаруживают четкой связи с конкретными вспышками. Два примера малых протонных событий и импульсов рентгеновского излучения вспышек показаны на рис. 3. Импульсы малых потоков появились на фоне ряда мелких вспышек, в основном класса C, однако корреляция малого протонных событий, как и больших, измеряется сутками, но их структура импульсов сугубо индивидуальна, никаких характерных особенностей малые потоки не обнаруживают. Отсутствие корреляции малого протонного события с конкретной вспышкой, наблюдаемой на диске Солнца, по-видимому, указывает на генерацию такого события на обратной стороне Солнца и распространение протонов вдоль удачно расположенных спиральных линий магнитного поля.



Рис. 3. Вверху - рентгеновское излучение вспышек. Внизу – типичные малые потоки протонов по данным аппарата GOES.

#### Выводы.

1. Анализ измерений на нейтронных мониторах и на аппаратах GOES позволяет утверждать, что большие протонные события генерируются токовом слое во время вспышки. Четкая корреляция малых протонных событий с конкретными вспышками не обнаружена. По-видимому, малые события генерируются вспышками на обратной стороне Солнца.

2. Для ускорения протонов в ударных волнах необходимо, чтобы ларморовский радиус частицы превосходил толщину фронта ударной волны. Это условие делает невозможным генерацию релятивистских солнечных протонов ударными волнами в межпланетной среде.

3. Потоки протонов солнечных космических лучей обнаруживают четыре характерных масштаба времени:

а). Длительность генерации ускоренных протонов равна длительности вспышки t<sub>SF</sub>~20-30 мин.

б). Типичная длительность потока ускоренных протонов на орбите Земли равна времени распространения солнечного ветра  $t_{SW} = 1$ а.u./ $V_{SW} \sim 3$  суток. Это значит, что наиболее запаздывающие протоны оказываются захваченными магнитным полем солнечного ветра и приходят к Земле поперек магнитного поля со скоростью солнечного ветра.

крутого фронта потока релятивистских c). Запаздывание прихода протонов, генерируемого Западной вспышкой, к орбите Земли t<sub>F</sub> = 15 – 20 мин. определяется ~1.5a.u./c. пролетным временем протонов вдоль линий спирали Архимеда Бесстолкновительный поток протонов вдоль спиральной линии магнитного поля несет информацию о спектре вспышечных протонов, который по данным нейтронных мониторов имеет экспоненциальный вид.

д). Фронт потока протонов от Восточных вспышек никогда не бывает крутым. Приход пологого (~1 суток) фронта потока релятивистских протонов от Восточной вспышки к орбите Земли с запаздыванием  $t_D \sim 3 - 5$  часов может быть связан с диффузией поперек поля при рассеянии протонов на магнитных неоднородностях. Диффузионный поток опережает поток солнечного ветра.

4. Протонные события от восточных вспышек регистрируются на порядок величины реже, чем от западных вспышек. Это связано с отсутствием линий магнитного поля, соединяющих восточную вспышку с околоземным пространством.

Участники группы: А. И. Подгорный (ФИАН), И. М. Подгорный (ИНАСАН).

110

### Публикации:

1. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Н. С. Мешалкина. Динамика магнитного поля активных областей в предвспышечном состоянии и во время вспышек. АЖ. **92**, №8 669–680 (2015).

2. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Ускорение солнечных космических лучей во вспышечном токовом слое и их распространение в межпланетном пространстве. АЖ. **92**, №9 767–776 (2015).

3. Podgorny A.I., Podgorny I.M. Acceleration and propagation of solar cosmic rays. Geomagnetism and Aeronomy. **55**, No. 8 (2015).

4. Podgorny I.M., Podgorny A.I. Solar cosmic ray acceleration and propagation. In Proc. Seventh Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere". Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June. P. 1 - 6. 2015.

5. Подгорный А.И., Подгорный И.М. Ускорение солнечных космических лучей и их распространение в межпланетной среде. Physics of auroral phenomena. Proc. 38 Annual Seminar. 2015. Apatity.