

## Направление 2. СОЛНЦЕ и ГЕЛИОСФЕРА

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

2.1.	Проект 2.1. Солнце		
	Тема 2.1.1 Изучение динамики плазмы, волновых процессов и неустойчивостей в бесстолкновительной замагниченной плазме солнечной короны и солнечного ветра с учетом эффектов анизотропии температуры.	ИЗМИРА Н	Кузнецов В.Д.
	Тема 2.1.2 Связь вариации крупномасштабных магнитных полей на Солнце и долговременных вариаций солнечной активности.	ИЗМИРА Н	Обридко В.Н.
	Тема 2.1.3. Природа эруптивных явлений на Солнце и их влияние на космическую погоду.	ИЗМИРА Н	Фомичёв В.В.
	Тема 2.1.4. Выделение эволюционных дескрипторов солнечных эруптивных событий на разных уровнях атмосферы Солнца и оценка их предсказательной эффективности.	ГАО РАН	Макаренко Н.Г.
	Тема 2.1.5. Исследования структуры и динамики магнитных полей на Солнце, моделирование активных солнечных образований	ГАО РАН	Соловьёв А.А.
	Тема 2.1.6. Многоволновая диагностика солнечных источников возмущений в гелиосфере: вспышки, ускоренные частицы	ГАО РАН	Степанов А.В.
	Тема 2.1.7. Формирование предвспышечного состояния активных областей по данным спектрально-поляризационных радионаблюдений.	СПб САО РАН	Богод В.М.
	Тема 2.1.8. Механизмы формирования и источники энергии солнечных вспышек малых энергий.	ФИАН	Богачёв С.А.
	Тема 2.1.9. Исследование механизма накопления энергии для солнечной вспышки – МГД моделирование для реальных активных областей и анализ наблюдательных данных.	ИНАСАН	Подгорный И.М.
	Тема 2.1.10. Получение временных, энергетических и	ФТИ РАН	Чариков

	угловых зависимостей функции распределения ускоренных электронов на основе экспериментального и теоретического изучения генерации жесткого рентгеновского излучения на разных стадиях развития вспышки.		Ю.Е.
	Тема 2.1.11. Нагрев плазмы, ускорение частиц и генерация электромагнитного излучения в солнечной атмосфере	ИПФ РАН	Зайцев В.В.
	Тема 2.1.12. Исследование процесса ускорения электронов, генерирующих жесткое рентгеновское и микроволновое излучение без эффективного нагрева плазмы в длительных солнечных вспышках.	ИКИ РАН	Струминский А.Б.
	Тема 2.1.13. Построение уточненной модели Солнца на основе последних достижений в описании свойств слабонеидеальной плазмы и процессов в ней.	ОИВТ РАН	Старостин А.Н.
	Тема 2.1.14. Длительные изменения физических характеристик солнечных пятен	ГАО РАН	Ю.А.Наговицын
<b>2.2.</b>	<b>Проект 2.2. Солнечный ветер</b>		
	Тема 2.2.1. Численное и аналитическое решение задачи о взаимодействии солнечных магнитогидродинамических (МГД) быстрых ударных волн со структурами с постоянным давлением, типичными для солнечного ветра, и с магнитосферой Земли, приводящем к распаду произвольного разрыва	ГАО РАН	Гриб С.А.
	Тема 2.2.2. Механизм ускорения солнечного ветра; физическая природа турбулентности солнечного ветра	ПРАО АКЦФИАН	Чашей И.В.
	Тема 2.2.3. Закономерности формирования и ускорения солнечного ветра по данным его радиозондирования сигналами заходящих за солнце космических аппаратов	ФИРЭ РАН	Ефимов А.И.
	Тема 2.2.4. Долговременные вариации потоков солнечного корпускулярного излучения.	ФТИ РАН	Ануфриев Г.С.
	Тема 2.2.5. Влияние крупномасштабного магнитного	ГАО РАН	Тлатов

	поля на формирование короны и солнечного ветра.		А.Г.
	Тема 2.2.6. Исследование источников солнечного ветра и классификация на основе наблюдаемой топологии, теоретических моделей и безразмерного масштабного анализа основных физических параметров	ИКИ РАН	Веселовский И.С.
<b>2.3.</b>	<b>Проект 2.3. Солнечно-земные связи</b>		
	Тема <b>2.3.1.</b> Исследование турбулентности солнечного ветра и магнитослоя с рекордно высоким временным разрешением Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли	ИКИ РАН	Застенкер Г.Н.
	<b>Тема 2.3.2.</b> Исследование крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в переносе возмущений от Солнца к магнитосфере Земли	ИКИ РАН	Ермолаев Ю.И.
	Тема 2.3.3. Изучение физических процессов, происходящих в околоземном космическом пространстве. Солнечная генерация и модуляция космических лучей по наземным наблюдениям.	ИЗМИРАН	Белов А.В.
	Тема 2.3.4. Исследование устойчивости циклического режима солнечной активности на временной шкале до сотен миллионов лет	СПбФ ИЗМИРАН	TBD
	Тема 2.3.5. Исследование воздействия космических лучей, солнечной активности и солнечного ветра на нижнюю атмосферу Земли	ФТИ РАН	Дергачёв В.А.
<b>2.4.</b>	<b>Проект 2.4. Гелиосфера</b>		
	Тема 2.4.1. Исследование ускорения заряженных частиц при взаимодействии электромагнитных волн с плазмой на границе гелиосферы	ИКИ РАН	Ерохин Н.С.
	Тема 2.4.2. Газодинамические модели физических явлений, встречающихся в солнечной системе. Проект направлен на решение фундаментальной проблемы взаимодействия Солнца и межпланетной среды с окружающей их межзвездной средой и телами солнечной системы.	ИПМех РАН	Баранов В.Б.

	Тема 2.4.3. Исследование физических процессов на границе гелиосферы - области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой - посредством теоретического анализа взаимодополняющих экспериментальных данных	ИКИ РАН	Измоленов В.В.
<b>2.5.</b>	<b>Проекты СО РАН</b>		
	Волновой аспект солнечно-магнитосферного взаимодействия	ИСЗФ СО РАН	А.С. Потапов
	Динамические процессы в плазме Солнца, солнечном ветре и магнитосферах планет	ИСЗФ СО РАН	В.М. Григорьев, А.С. Леонович
	Лабораторное и численное моделирование продольных токов планетарных магнитосфер и эффектов энергетического воздействия в ионосфере Земли (	Институт лазерной физики СО РАН	И. Ф. Шайхисламов

## **Проект 2.1. Солнце**

### **Тема 2.1.1. Волновые и нетепловые процессы в плазме солнечной короны и солнечного ветра.**

Рук. Кузнецов В.Д., ИЗМИРАН, kvd@izmiran.ru

На основе 16-моментных МГД-уравнений, которые учитывают тепловые потоки в анизотропной бесстолкновительной плазме солнечной короны и солнечного ветра, рассмотрены свойства неустойчивостей. Для всех возникающих в МГД приближении неустойчивостей (обычная несжимаемая шланговая неустойчивость, вторая сжимаемая почти продольная шланговая и почти поперечная зеркальная неустойчивость замедленных магнитозвуковых мод, а также тепловая неустойчивость, вызванная тепловым потоком вдоль магнитного поля) рассмотрены их аналоги в кинетическом приближении. Исследовано кинетическое дисперсионное уравнение в низкочастотном диапазоне вблизи тепловой скорости ионов. Учтено течение ионного компонента плазмы вдоль магнитного поля. Сравнения МГД и кинетических порогов и инкрементов неустойчивостей показали хорошее согласие двух подходов, что обосновывает использование 16-моментных МГД уравнений для описания с хорошей точностью динамики бесстолкновительной плазмы солнечной короны и солнечного ветра и ее макроскопических свойств.

Публикации:

1. В.Д.Кузнецов, Н.С.Джалилов. МГД-неустойчивости анизотропной космической плазмы с тепловыми потоками. Геомагнетизм и аэрономия, т.54. № 7, 2014.
2. Н.С.Джалилов, В.Д.Кузнецов. О низкочастотных неустойчивостях бесстолкновительной плазмы и 16-моментном приближении. ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2013, т.39, № 12, с.1122-1130
3. В.Д.Кузнецов, Н.С.Джалилов. МГД-волны и неустойчивости анизотропной космической плазмы: 16-моментное приближение. Сборник статей "Современные достижения в плазменной гелиогеофизике". ИКИ, 2014-2015.

### **Тема 2.1.2. Связь вариации крупномасштабных магнитных полей на Солнце и долговременных вариаций солнечной активности**

Руководитель темы Обридко В.Н. ИЗМИРАН, obridko@izmiran.ru

На основе простейших динамо моделей описана процедура переполюсовки глобального магнитного поля. Оказалось, что по мере приближения ко времени смены ориентации поля ориентация магнитной оси глобального диполя становится довольно случайной, так что в период смены ориентации этот магнит естественно рассматривать как сравнительно долгоживущую флуктуацию. По мере удаления от момента смены ориентации роль флуктуационного поведения падает. Подобное поведение обнаружено как в наблюдательных данных, так и в поведении теоретических моделей магнитного поля. В обоих случаях направление магнитного момента вблизи инверсии меняется хаотично, хотя каждый раз по-разному.

Публикация:

V. V. Pipin, D. Moss, D. Sokoloff, J. T. Hoeksema, A&A 567, A90, 8 pages, 2014.

### **Тема 2.1.3. Природа эруптивных явлений на Солнце и их влияние на космическую погоду,**

Руководитель В.В.Фомичев, ИЗМИРАН, [fomichev@izmiran.ru](mailto:fomichev@izmiran.ru)

В соответствии с планом работ 2014 г. исследования проводились по следующим направлениям:

1. Изучение трехмерной структуры протуберанцев и волокон по наблюдениям внутренних движений в них.
2. Анализ сильнейшей геомагнитной бури 23-го цикла 18 ноября 2003 г. в рамках представлений об аномально слабом расширении магнитного облака при его распространении от Солнца до Земли.
3. Исследование тонкой структура радиоизлучения, сопровождающего корональные выбросы массы.

#### **Полученные результаты.**

- 1) Показано, что для выяснения истинной магнитной структуры волокон необходим анализ их изображений, полученных одновременно в различных проекциях, исследование траекторий отдельных узлов, движущихся внутри тела волокон, сопоставление их структуры с распределением фотосферных магнитных полей.
- 2) Предложена интерпретация загадочного события 18-20 ноября 2003 г., в котором довольно незначительная солнечная эрупция, сопровождавшаяся весьма умеренными вспышными эпизодами и средними по размерам и скоростям корональными выбросами, вызвала самую интенсивную геомагнитную бурю 23-его цикла.

3) На примере лимбового явления 24 февраля 2011 г. показано, что появление структуры типа зебра в диапазоне 2.6 – 3.8 ГГц совпало с магнитным пересоединением в короне с X-точкой на высотах ~40000 км, наблюдавшемся в линии 171 Å на SDO/AIA..

Публикации:

- 1) Koutchmy S., Filippov B., Tavabi E., Bazin C., Weiller S., 3D dynamical structuring of a high latitude erupting prominence: I- Analysis of the cool plasma flows before the eruption, Nature of Prominences and their role in Space Weather, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium No. 300, pp. 430-432, 2014.
- 2) Koutchmy S., Filippov B., Tavabi E., Bazin C., Weiller S., 3D dynamical structuring of a high latitude erupting prominence: II- Analysis of the coronal context and eruption, Nature of Prominences and their role in Space Weather, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium No. 300, pp. 433-434, 2014.
- 3) Grechnev V.V., A.M. Uralov, V.A. Slemzin, I.M. Chertok, G.V. Rudenko, B.P. Filippov, M. Temmer. A Challenging Solar Eruptive Event of 18 November 2003 Event and Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. I. Unusual History of an Eruptive Filament. *Solar Phys.*, Volume 289, Issue 1, pp 289-318, 2014, doi: [10.1007/s11207-013-0316-6](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0316-6). <http://arxiv.org/pdf/1304.7950v1.pdf>
- 4) Grechnev V.V., A.M. Uralov, I.M. Chertok, V.A. Slemzin, B.P. Filippov, Ya.I. Egorov, V.G. Fainshtein, A.N. Afanasyev, N.P. Prestage, M. Temmer. A Challenging Solar Eruptive Event of 18 November 2003 Event and Causes of the 20 November Geomagnetic Superstorm. II. CMEs, Shock Waves, and Drifting Radio Bursts. *Solar Phys.*, Volume 289, Issue 4, pp 1279-1312, 2014, doi: [10.1007/s11207-013-0397-2](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0397-2). <http://arxiv.org/pdf/1308.3010v1.pdf>
- 5) Chernov, G.P., Fomichev, V.V., Tan B.L., Yan, Y.H, Tan Ch.M., Fu. Q.J.: Dynamics of flare processes and variety of the fine structure of solar radio emission over a wide frequency range of 30 - 7000 MHz, 2014, Solar Physics, 289, 11, 1-25.

**Тема 2.1.4. Выделение эволюционных дескрипторов солнечных эруптивных событий на разных уровнях атмосферы Солнца и оценка их предсказательной эффективности**

Руководитель Н.Г.Макаренко, ГАО РАН, ng-makar@mail.ru

Исследования были ориентированы на описание и диагностику динамических режимов магнитных полей Солнца на основе топологических инвариантов полученных по HMI/SDO магнитограммам активных областей.

В текущем году были разработаны алгоритмы для оценок чисел Бетти по фрагментам магнитограмм размером 500x500 пикселей. Числа Бетти дают распределение числа критических точек наблюдаемой компоненты поля в зависимости от уровня напряженности (плотности потока).

**Основной результат:** Численные эксперименты с HMI-магнитограммами вспышечных АО показали что вариации характеристики Эйлера отслеживают перестройки топологии АО, которые сопровождают или предваряют X вспышки.

Публикация:

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.

**Тема 2.1.5. Исследования структуры и динамики магнитных полей на Солнце, моделирование активных солнечных образований**

Руководитель Соловьев А.А. ГАО РАН, [solov@gao.spb.ru](mailto:solov@gao.spb.ru)

**1. Модель мелкого солнечного пятна**

Построена основанная на данных локальной гелиосейсмологии модель мелкого солнечного пятна с глубиной нижней границы на уровне 4Мм. Модель **впервые** позволила: 1. теоретически вывести зависимость магнитного поля пятна от его размера (радиуса тени), соответствующую наблюдаемой; 2. найти физический механизм, обеспечивающий устойчивость пятна; 3. установить границы этой устойчивости по отношению к вертикальным колебаниям пятна как целого и 4. рассчитать период таких колебаний. Наиболее устойчивы пятна с напряженностью поля 2600-2700 Гс и радиусом тени около 5 Мм. Период их собственных колебаний составляет 10-12 часов, в согласии с результатом исследований, проведенных в лаборатории ЛФС ГАО по данным обсерватории SOHO/MDI.

**2. Жгутовый механизм развития солнечной вспышки.**

Промоделировано развитие уникальной вспышки от 22/09/2011, в которой в течение многих часов наблюдалось втягивание холодного хромосферного вещества в горячую область энерговыделения (низколежащий магнитный жгут). Согласно модели, вспышка вызвана возбуждением плазменной турбулентности в той части магнитного жгута, где по условиям равновесия плотность плазмы упала до критического уровня, при котором дрейфовая скорость электронов приблизилась к тепловой.

**3. Модель корональной каверны.**



Впервые развита динамическая модель корональной каверны, которая представлена в виде горизонтального магнитного жгута с вращающейся азимутальной оболочкой. В результате численного моделирования показано, что развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца приводит к распаду жгута на отдельные круговые волокна на временах порядка 5-10 вращательных периодов. Такая сложная волокнистая структура хорошо соответствует строению наблюдаемых в солнечной короне каверн.

#### 4. Особенности развития 24-го цикла солнечной активности.

Проанализировано развитие текущего цикла по данным SDO. Показано запаздывание смены знаков полярного магнитного поля, отмечено формирование зон перемежающейся полярности.

##### Публикации:

1. V.I. Efremov, L.D. Parfinenko, A.A. Solov'ev, E.A. Kirichek. Long-Period Oscillations of Sunspots Observed by SOHO/MDI // **Solar Physics**. Vol. 289, pp. 1983-1998. **2014**.
2. Р.А. Бисенгалиев, В.В.Мусцовой, А.А.Соловьев. Центробежные эффекты и неустойчивость Кельвина—Гельмгольца в корональных кавернах // **Астрономический журнал**. Том. 91. №4. Стр. 308-319 (2014) (Astronomy Reports. 2014. Vol. 58, no.4, pp.249-259).
3. Соловьев А.А. Киричек Е.А. Основные свойства солнечных пятен: равновесие, устойчивость и собственные колебания. В сб. «**Современные достижения плазменной гелиофизики**». Под ред. Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского. Электронное рецензируемое издание. Сайт <http://sdpg.cosmos.ru/>
4. Solov'ev A.A., K. Murawski. Does the energy-release region of the flare work as a vacuum cleaner? **Astrophysics and Space Science**. Vol. **350**. No.1, 11-19. (2014).
5. Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Basic properties of sunspots: equilibrium, stability and eigen oscillations. **Astrophysics and Space Science**. Vol. **352**. No.1, pp. 23-42; (2014).
6. Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Sunspot: shallow or deep? // **Geomagnetism and Aeronomy**, v. 54, №7. 8pp. (2014).
7. V.I. Efremov, L.D. Parfinenko, A.A. Solov'ev, K. Supergranulation Velocity Field from the MDI (SOHO) Data // **Geomagnetism and Aeronomy**, Vol. 54, No.8, 8pp. (2014).
8. Benevolenskaya, E., Slater, G., Lemen, J., Synoptic Solar Cycle 24 in Corona, Chromosphere, and Photosphere seen by the Solar Dynamics Observatory, 2014, **Solar Phys.**, 289, Issue 9, pp.3371-3379.

9. Benevolenskaya, E. E., Shapovalov, S. N., Kostuchenko, I. G. Solar Spectral Irradiance and Total Solar Irradiance at a Solar Minimum, **Geomagnetism and Aeronomy**, 2014, Vol. 54, No. 7, 7 pp.

10. Benevolenskaya, E. E., Kostuchenko, I. G., Active Longitudes in Minima of Solar Activity, **Geomagnetism and Aeronomy**, 2014, Vol. 54, No. 8, 7pp.

#### **Тема 2.1.6. Многоволновая диагностика солнечных источников возмущений в гелиосфере: вспышки, ускоренные частицы**

Руководитель: А.В.Степанов, ГАО РАН, [stepanov@gao.spb.ru](mailto:stepanov@gao.spb.ru)

##### **1. Пульсации суб-терагерцового излучения солнечных вспышек в хромосфере и диагностика электрического тока**

Предложена модель пульсаций суб-ТГц излучения солнечных вспышек. Модель основана на представлении вспышечной арки в виде эквивалентного электрического (RLC) контура и объясняет следующие наблюдаемые особенности (Kaufmann et al., ApJ, 2009): частоту пульсаций (0.2-8 Гц), высокую добротность,  $Q \geq 10^3$ , малую глубину модуляции, синхронизм в различных диапазонах наблюдений, зависимость частоты пульсаций от потока излучения. Методом Ван-дер-Поля решено уравнение для осцилляций электрического тока и найдено стационарное значение амплитуды осцилляций тока. На основании предложенной модели по свойствам пульсаций во вспышке 4 ноября 2003 г. найдено уменьшение тока от значения  $1.7 \times 10^{12}$  А в максимуме вспышки до  $4 \times 10^{10}$  А после вспышки. Модель пульсаций согласуется с плазменным механизмом суб-ТГц излучения из хромосферы, предложенного Зайцевым, Степановым и Мельниковым (ПАЖ, 2013).

##### Публикация:

Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kaufmann P.: On the Origin of Pulsations of Sub-THz Emission from Solar Flares // *Solar Physics*, V.289, No 8, pp. 3017-3032 (2014).

##### **2. Распространение энергичных электронов на затухающей стадии вспышки.**

В терминах «ловушки с высыпанием частиц» исследованы особенности нетеплового излучения на затухающей стадии солнечной вспышки 3 ноября 2004 г. Анализ данных радиогелиографа и поляриметров обсерватории Nobeyama (Япония), космических обсерваторий GOES и RHESSI привёл к выводу, что спектральные индексы микроволнового и жёсткого рентгеновского излучения остаются постоянными или уменьшаются. Данные микроволнового излучения, в отличие от рентгеновских данных, свидетельствуют об увеличении скорости «высыпания» частиц из вспышечных петель.

Это может быть вызвано различными режимами диффузии ускоренных захваченных частиц в конус потерь. Приведены аргументы в пользу режима «сверхсильной» диффузии.

Публикация:

[Huang, Jing](#); [Yan, Yihua](#); [Tsap, Yuri T.](#): Energetic Electron Propagation in the Decay Phase of Non-thermal Flare Emission // Astrophysical Journal, Vol. **787**, Issue 2, pp. 123-131 (2014).

### **3. Инверсия поляризации микроволнового излучения вдоль вспышечной петли.**

Проанализировано распределение степени круговой поляризации вдоль солнечных вспышечных петель в событии 19 июля 2012 года. Установлено, что поляризация в области вблизи северного и южного оснований остается отрицательной в течение всего всплеска. В вершине петли поляризация имеет обратный знак (положительный), и ее знак также сохраняется в течение всего всплеска. В областях между вершиной и основаниями поляризация меняет знак в ходе всплеска с отрицательной на положительную и наоборот. Анализ распределения фотосферного магнитного поля и пространственной ориентации петель позволяет сделать вывод о том, что круговая поляризация вблизи оснований соответствует необыкновенной волне, а в верхней части петель – обыкновенной. 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).

Публикации:

1. Melnikov V F., Morgachev A S, Kuznetsov S A " Spatial distribution of microwave emission along flare loops as a tool for the measurement of anisotropy of accelerated electrons". // Advances in Space Research, 2014
2. [Kuznetsov, Sergey](#); [Melnikov, Victor](#); [Morgachev, Alexander](#) Spatial distribution of microwave characteristics along limb flare loop July 19, 2012 // 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract D2.5-84-14.

**Тема 2.1.7. Формирование предвспышечного состояния активных областей по данным спектрально-поляризационных радионаблюдений**

Руководитель: Богод В.М. СПбФ САО РАН, , [vbog\\_spb@mail.ru](mailto:vbog_spb@mail.ru)

## **1. Микроволновый мониторинг солнечной активности 2014г. и автоматизированная база данных спектрально-поляризационных наблюдений на РАТАН-600.**

Продолжено проведения серий наблюдательных программ в годы максимума 24 цикла солнечной активности на Южном секторе с Перископом радиотелескопа РАТАН-600 и дальнейшее формирование базы данных. Реализован режим мониторинга в многочастотных наблюдениях активных областей на Солнце с высоким пространственным разрешением с выдачей оперативных данных о спектрально-поляризационных характеристиках на многоволновом комплексе в широком диапазоне частот 0.75-18.2 ГГц. Мониторинг проводится в режиме многоазимутальных наблюдений в диапазоне 4 часов ежедневных наблюдений с 8-минутным временным интервалом со спектральным разрешением  $\sim 1\%$ .

База многоволновых наблюдений Солнца на РАТАН-600 обработана, стандартизована и охватывает период с 1999 по 2014гг. В 2014г. было проведено 4000 наблюдений Солнца на многоволновом спектрально-поляризационном комплексе РАТАН-600 на день составления отчета. Наличие базы данных позволяет осуществлять тестирование моделей и критериев прогнозирования активности на фактическом материале.

Проведена проверка известного критерия прогнозирования протонной активности Танака-Еноме, который показал высокие результаты для мощных событий. Однако в связи с пониженной активностью максимума 24 цикла критерий Танака-Еноме был адаптирован для прогнозирования менее мощных вспышек с рентгеновским классом М и С. Несмотря на низкий уровень активности, тем не менее, ряд вспышечных событий классов М и даже С был зарегистрирован, дополнительно к регистрации одиноких мощных активных областей

## **2. Микроволновые наблюдения инверсии знака круговой поляризации излучения активных областей**

С целью автоматизации поиска частотной инверсии круговой поляризации в широком диапазоне частот 3-18 ГГц разработан и внедрен алгоритм анализирующий поляризованный сигнал по всему частотному спектру в каждой точке скана. Для поиска инверсий разработан веб интерфейс ([http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat\\_invers.ion](http://www.spbf.sao.ru/cgi-bin/ion-p?page=rat_invers.ion)), к которому есть доступ с главной страницы ИС «Прогноз». Исследования этих эффектов важны для диагностики физических параметров солнечной атмосферы, обнаружения изменений структуры магнитного поля (всплытие нового магнитного потока), прогноза вспышечной активности, и др. Решение таких задач

становится доступным путем анализа результатов поляризационных наблюдений с высоким частотным разрешением на радиотелескопе РАТАН-600.

Публикации:

- Тохчукова С.Х., Богод В.М., Петерова Н.Г., Шендрик Е.В., Курочкин Е.А., Автоматическая система прогноза геоэффективных вспышек на основе анализа спектральных характеристик радиоизлучения активных областей. Геомagnetизм и аэрoномия, том. **54**, №7 (2014).
- O.A.Golubchina, A.N.Korzhavin, 2013: Comparative Analysis of the Distribution of Brightness Temperatures in the Solar Polar Region Based on Observational Data Obtained with RATAN-600 in the Microwave Range during the Solar Eclipse of March 29, 2006. Geomagnetism and Aeronomy, vol. **54**, No.8, 1039-1044, 2014.

**Тема 2.1.8. Механизмы формирования и источники энергии солнечных вспышек малых энергий.** Рук. проекта д.ф.-м.н. С.А. Богачев (ФИАН)

По данным телескопа ТЕСИС на спутнике КОРОНАС-Фотон впервые проведены непрерывные измерения формирования и движения коронального выброса массы (КВМ) в каналах 171 и 304 А от момента формирования выброса в нижней короне до его появления в поле зрения коронографов LASCO. Показано, что выброс был сформирован на высоте 0.2–0.5 радиуса Солнца над поверхностью и имел U-образную структуру, которая наблюдалась в линии 171 и белом свете. Одновременно с КВМ телескопами ТЕСИС был зарегистрирован эруптивный протуберанец в линии 304 А, положение которого может быть объяснено в рамках так называемой модели break-out. Измерена траектория КВМ, его скорость. Показано, что масса КВМ увеличивалась со временем.

**ПУБЛИКАЦИЯ:**

**The Astrophysical Journal, 793:140 (12pp), 2014 October 1**

A. A. Reva, A. S. Ulyanov, S. A. Bogachev, and S. V. Kuzin,

«Initiation and early evolution of the coronal mass ejection on 2009 may 13 from extreme-ultraviolet and white-light observations»

По данным телескопов СПРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф впервые измерены и опубликованы ВУФ спектры четырех больших солнечных вспышек классов М5.6, X1.3, X3.4, и X17 со спектральным разрешением 0.1 А. Проведена идентификация спектра – более 50 линий, соответствующих температуре от 0.5 до 16 МК, большинство из

которых соответствовало ионам Fe, Ni, Ca, Mg, и Si. По линиям Fe XI–Fe XIII определена концентрация электронов во вспышечной плазме:  $6.5 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

ПУБЛИКАЦИЯ:

**The Astrophysical Journal, 780:15 (16pp), 2014 January 1**

S. Shestov, A. Reva<sup>1</sup>, and S. Kuzin

«Extreme ultraviolet spectra of solar flares from the extreme ultraviolet spectroheliograph SPIRIT onboard the CORONAS-F satellite»

**Тема 2.1.9. Исследование механизма накопления энергии для солнечной вспышки – МГД моделирование для реальных активных областей и анализ наблюдательных данных.**

Руководитель И.М.Подгорный (ИНАСАН)

**Ускорение и распространение солнечных космических лучей.**

Проведен первый этап анализа измерений ускоренных во вспышках протонов на аппарате GOES. Исследована асимметрия прихода к Земле протонов с энергией 10 – 100 МэВ от вспышек на западе и востоке солнечного диска. На рис. 1 показаны типичные данные. Так называемая быстрая компонента приходит только от западных вспышек. Она начинает регистрироваться через ~20 мин после фронта рентгеновского излучения – это протоны, распространяющиеся вдоль линий поля спирали Архимеда и приходящие к Земле с пролетными временами. Протоны быстрой компоненты не претерпевают рассеяния и несут информацию о механизме ускорения. Быстрая компонента обладает экспоненциальным спектром, генерируемым, как показало численное моделирование, при ускорении полем Лоренца вдоль особой X-линии магнитного поля токового слоя. Расчетный и измеренный спектры быстрой компоненты совпадают при скорости пересоединения  $2 \times 10^7 \text{ см/с}$ . Быструю компоненту сопровождает запаздывающий поток протонов, который длится более двух суток.

Фронт прихода протонов от вспышек, происшедших в восточной и центральной частях солнечного диска, запаздывает на 5 – 10 часов (Рис. 1б), а быстрая компонента не регистрируется. Приход к Земле протонов от вспышек в центре и на востоке солнечного диска может происходить только поперек линий межпланетного магнитного поля. Запаздывание 5 – 10 часов потока почти на порядок меньше, чем время дрейфа со скоростью солнечного ветра. По-видимому, скорость распространения возрастает из-за диффузии при рассеянии на неоднородностях магнитного поля. При этом происходит

эволюция спектра. Запоздывающие релятивистские протоны обладают степенным спектром. Причиной изменения спектра может быть рассеяние на магнитных флуктуациях. Предварительные данные показывают, что быстрая и запоздывающая компоненты протонов генерируются во вспышке, и их происхождение не связано с ударной волной перед выбросом корональной плазмы.

#### **Анализ динамики активных областей, вызвавших вспышки.**

Использование непосредственно измеряемой компоненты фотосферного поля вдоль луча зрения на аппаратах SOHO и SDO для вычисления потока неприемлемо, т. к. величина этой компоненты зависит от положения активной области на диске. Нормальная составляющая фотосферного поля вычислялась в потенциальном приближении. Показано, что критическое значение магнитного потока для возникновения большой вспышки  $10^{22}$  Мкс, установленное в наших ранее опубликованных работах, является необходимым для возникновения вспышек, но не достаточным. Вспышки возникают только над областями, имеющими сложное распределение источников магнитного поля. Такое распределение фотосферных источников создает над активной областью конфигурацию линий поля с особыми линиями X-типа. В окрестности особых линий могут формироваться токовые слои, в магнитном поле которых может запасаться энергия, необходимая для вспышки. Простые дипольного типа активные области, состоящие из одного северного и одного южного пятен, магнитные линии над которыми имеют только арочную форму и отсутствуют особые линии, не вызывают вспышек. Таким образом, главными условиями появления вспышки является большой магнитный поток активной области и сложное распределение поля ( $\beta\gamma\delta$  конфигурация).

**Исследовано поведение распределения магнитного поля в активных областях во время вспышек и в спокойные периоды.** Несмотря на сложный характер распределения поля с множеством острых максимумов северной и южной полярности никаких особенностей магнитного поля активной области во время вспышки не обнаруживается. Величины максимумов поля и их положения остаются практически неизменными. Постоянство распределения поля и магнитного потока с точностью до 1% показывают, что магнитная энергия во время вспышки не поступает от фотосферы. Магнитная энергия может медленно запасаться в токовой системе перед вспышкой в короне. Токи токового слоя, расположенного высоко в короне, быстро затухают во время вспышки и не могут вызвать заметных возмущений на фотосфере. Численное МГД моделирование показало, что токовый слой возникает перед вспышкой над активной

областью, и его положение совпадает с источником теплового рентгеновского излучения.

Проведена модернизация программы визуализации результатов численного моделирования с одновременными вычислениями, предназначенная для оперативного отыскания положения токовых слоев. Программа ведет поиск источников теплового рентгеновского излучения во время вспышки, поскольку они должны располагаться в токовых слоях, где в результате диссипации магнитного поля происходит нагрев плазмы до температуры более тридцати миллионов градусов.

Публикации:

1. Мешалкина Н.С., Подгорный А.И., Подгорный И.М. Исследование поведения магнитного поля в активной области при возникновении больших (класса X) солнечных вспышек путем численного МГД моделирования. Труды конференции Всероссийская конференция. XXIV Всероссийская конференция "Распространение радиоволн". Т. 1. Математическое моделирование проблем электродинамики и распространения радиоволн. МСЗФ СО РАН. Стр. 146-149. 2014. Иркутск.
2. Подгорный А.И., Подгорный И.М. МГД моделирование положения источников жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек и сравнение с наблюдениями. Солнечная и Солнечно-Земная Физика - 2013. Труды XVIII Пулковской ежегодной конференции по физике Солнца. 2014. С. 207 - 210.
3. Подгорный И.М., Подгорный А.И., Мешалкина Н.С. Магнитное поле активных областей и его связь с появлением вспышек. Солнечная и Солнечно-Земная Физика - 2013. Труды XVIII Пулковской ежегодной конференции по физике Солнца. 2014. С. 211 -214.
4. Podgorny A.I., Podgorny I.M. Coronal current sheet as a source of thermal X-ray. Geomagnetism and Aeronomy. **54**, No. 7. ????? (2014).

**ТЕМА 2.1.10. Получение временных, энергетических и угловых зависимостей функции распределения ускоренных электронов на основе экспериментального и теоретического изучения генерации жесткого рентгеновского излучения на разных стадиях развития вспышки.**

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

В результате анализа жесткого рентгеновского излучения 83 солнечных вспышек получены спектры временных задержек. Выделены три вида спектров – спадающие с ростом энергии, U- образные и растущие. Распределение вспышек по виду спектра



примерно одинаковое. Временные задержки ЖРИ связаны с процессом распространения электронов в магнитных петлях. Модельные расчеты кинетики пучка электронов и тормозного рентгеновского излучения при разумных начальных условиях объясняют задержки с растущим спектром по энергии. Спадающий характер спектра задержек удается получить только в модели с разнесенными в пространстве областями ускорения и последующей инжекции в магнитную петлю. Поэтому в таких вспышках предполагается, что ускорение электронов имеет место высоко в короне, с последующим свободным разлетом в корональной части петли (область инжекции) и дальнейшим распространением в хромосферной части петли. Рассмотрены спектральные, временные и пространственные характеристики источников жесткого рентгеновского и микроволнового излучения во время вспышек 24.02.2011г. и 05.06.2005г., полученные во время работы спутника RHESSI и наблюдений на радиогелиографе Nobeyama. Во вспышке, 05.06.2005 г., имеет место соответствие тонкой временной структуры временных профилей микроволнового (34 ГГц) и жесткого рентгеновского (25-300 кэВ) излучений. Во временных профилях обнаружены квазипериодические пульсации с доминирующими периодами порядка 25 с и 50 с. Обращает на себя внимание перераспределение амплитуды глубины модуляции во времени. В течение импульсной фазы всплеска ее амплитуда достаточно высокая, более 50 %. На фазе спада всплеска она уменьшается до 10-20 %. Для объяснения указанных особенностей в ЖРИ и микроволновом излучении численно решается нестационарная задача распространения ускоренных электронов вдоль вспышечной петли с учетом кулоновских соударений, магнитного отражения и обратного тока. Анализируются модели изотропной инжекции электронов и анизотропной, в узком конусе углов. Магнитное поле полагается переменным вдоль петли и во времени. Показано, что пространственное распределение источников вспышечного излучения и временной ход (пульсации) могут быть объяснены в указанной модели распространения электронов.

#### Публикации:

1. V.D.Pal'shin, Yu.E.Charikov, R.L.Aptekar, S.V.Golenetskii, A.A.Kokomov, D.s.Svinkin, Z.Ya.Sokolova, M.V.Ulanov, D.D.Frederiks, A.E.Tsvetkova Konus-Wind and Helicon-Coronas\_F Observations of Solar Flares// Geomagnetism and Aeronomy, 2014, Vol.54,N7, pp.943 – 948
2. Yu.E.Charikov, R.L.Aptekar, S.V.Golenetskii, I.V.Kudriavtsev, S.A.Kuznetsov, V.F.Mel'nikov, V.D.Pal'shin, D.S.Svinkin, Z.Ya.Sokolova, M.V.Ulanov, D.D.Frederiks, A.E.Tsvetkova, A.N.Shabalin, Analysis of Hard X and Gamma - -Rays and Microwave

Emission during the Flare of July 18,2002// Geomagnetism and Aeronomy, 2014, Vol.54, N8,pp.1058 – 1056

3. Чариков Ю.Е., Глобина В.И., Шабалин А.Н., Елфимова Е.П., Моделирование временных задержек жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014.N4( в печати)

### **ТЕМА 2.1.11. Нагрев плазмы, ускорение частиц и генерация электромагнитного излучения в солнечной атмосфере.**

Руководитель В.В.Зайцев (ИПФ РАН) [za130@appl.si-nnov.ru](mailto:za130@appl.si-nnov.ru)

#### **1. Спорадический нагрев плазмы в нижней хромосфере.**

Относительно давно широкое распространение получило мнение о том, что нагрев хромосферы и фотосферы происходит из-за вторжения энергичных частиц, электронов и протонов, ускоренных в короне Солнца, а именно, в вершинах вспышечных арок. При этом не рассматривалась возможность ускорения частиц и нагрева плазмы внутри самой хромосферы. С другой стороны, недавно получены наблюдательные данные, свидетельствующие о нагреве хромосферных оснований компактных магнитных петель до температуры  $\geq 10^6$  К (Жи и др. 2012), причем из оснований таких петель наблюдались выбросы горячей плазмы. Реализация плазменного механизма терагерцового излучения вспышек также может свидетельствовать о возможности нагрева до температур порядка  $10^5 - 10^6$  К глубоких слоев хромосферы с концентрациями до  $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Показано, что ускорение электронов и нагрев плазмы в нижней хромосфере могут реализоваться при развитии в хромосферных основаниях магнитной петли баллонной моды желобковой неустойчивости. Желобковая неустойчивость приводит к проникновению внешней хромосферной плазмы внутрь петли и вызывает генерацию индукционного электрического поля, эффективно ускоряющего электроны и приводящего к нагреву хромосферы *in situ*. Определена температура прогретой хромосферы и показано, что возникающее при этом ультрафиолетовое излучение не превышает уровня, наблюдаемого во время вспышек. Другой причиной нагрева хромосферы являются 5-минутные колебания скорости фотосферной конвекции, которые также приводят к модуляции электрических токов в магнитных петлях и к генерации индукционных электрических полей.

#### Публикация:

В.В. Зайцев, СПОРАДИЧЕСКИЙ НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В НИЖНЕЙ ХРОМОСФЕРЕ,

## **2. Суб-секундные квазипериодические пульсации терагерцового излучения**

Предложен механизм суб-секундных квазипериодических пульсаций терагерцового излучения солнечных вспышек, основанный на представлении вспышечной арки в виде эквивалентного электрического (RLC) контура. Механизм объясняет период осцилляций, их высокую добротность,  $Q \geq 10^3$ , синфазность пульсаций на разных частотах и наблюдаемые зависимости (Kaufmann et al. 2009) частоты осцилляций от потока ТГц-излучения. Методом Ван дер Поля решено нелинейное уравнение для осцилляций электрического тока и найдено установившееся значение. Предложенная модель пульсаций свидетельствует в пользу плазменного механизма суб-терагерцового излучения.

### Публикация:

V.V. Zaitsev, A.V. Stepanov, P. Kaufmann, On the Origin of Pulsations of Sub-THz Emission from Solar Flares, Solar Phys, DOI 10.1007/s11207-014-0515-9

## **3. Поляризация зебра-структуры в солнечных радиовсплесках.**

Обсуждается проблема происхождения поляризации солнечного радиоизлучения с тонкой структурой спектра типа зебра. В рамках плазменного механизма генерации на уровнях двойного плазменного резонанса поляризация радиоизлучения, принимаемого на Земле, обусловлена разной интенсивностью трансформации плазменных волн в обыкновенные или необыкновенные волны или разными условиями выхода этих волн из источника. В слабоанизотропной плазме, которая является источником зебра-структуры с достаточно высокими номерами гармоник, степень поляризации радиоизлучения на удвоенной плазменной частоте, возникшего в результате комбинационного рассеяния плазменных волн, пропорциональна малому фактору – отношению электронной гирочастоты к плазменной частоте, и не может быть значительной. Заметная поляризация может возникнуть только в случае, если наблюдаемое радиоизлучение есть результат рассеяния плазменных волн на ионах (в том числе, индуцированного) или слияния их с низкочастотными волнами. В этом случае обыкновенная волна свободно выходит с уровня генерации, а необыкновенная волна попадает в зону затухания и не покидает источник. В результате выходящее радиоизлучение оказывается полностью поляризованным со знаком обыкновенной волны. Обсуждаются возможные причины деполяризации радиоизлучения с зебра-структурой.

### Публикация:

**Тема 2.1.12. Исследование процесса ускорения электронов, генерирующих жесткое рентгеновское и микроволновое излучение без эффективного нагрева плазмы в длительных солнечных вспышках.** Руководитель А.Б.Струминский (ИКИ РАН)

### **1. НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ДО СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР (>30 МК) В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 9 АВГУСТА 2011 ГОДА**

Исследована самая горячая солнечная вспышка, наблюдавшаяся в 2000-2014 годах, X6.9 9 августа 2011 г. с максимальной температурой плазмы по данным GOES  $\approx 32.5$  МК. Анализ рентгеновских спектров по данным RHESSI проводился в рамках однотемпературного и двухтемпературного приближения с учетом излучения горячей ( $\sim 20$  МК) и сверхгорячей ( $\sim 45$  МК) плазмы и степенным спектром жесткого рентгеновского излучения. Показано, что наблюдаемые особенности вспышки лучше объясняются с помощью двухтемпературной модели. Формирование сверхгорячей плазмы может быть связано со слабым отводом тепла из-за подавления теплопроводности. Аномально высокая температура плазмы, наблюдавшаяся КА GOES, скорее всего является артефактом метода расчета температуры по двухканальным измерениям в рамках однотемпературного приближения, примененного к излучению многотемпературной вспышечной плазмы с малым вкладом низкотемпературной части дифференциальной меры эмиссии.

#### Публикация:

*Шарыкин И.Н., Струминский А.Б., Зимовец И.В. НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ДО СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР (>30 МК) В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ 9 АВГУСТА 2011 ГОДА // ПИСЬМА В АЖ, 2015, том 41, №1–2, с. 1–15*

### **2. Совместный анализ наблюдений высокоэнергичного гамма и жесткого рентгеновского солнечного и солнечных космических лучей**

Рассмотрено 18 солнечных вспышек, в которых было зарегистрировано гамма-излучение с энергией более 100 МэВ инструментом LAT/FermiGRO, проверены их временные профили в мягком (GOES) и жестком (ACS SPI) рентгеновских диапазонах, потоки солнечных космических лучей в гелиосфере (КА STEREO A/B, SoHO). Особое внимание уделено событию 7 марта 2012 года, когда LAT/FermiGRO регистрировал солнечное гамма-излучение более 20 часов. В 4 событиях из 18 ACS SPI был выключен. В 12 событиях наблюдались всплески жесткого рентгеновского

**излучения в импульсной фазе. Не обнаружено каких-либо всплесков жесткого рентгеновского излучения в моменты регистрации длительного гамма-излучения (или они были скрыты под фоном) ни в одном событии. Солнечные космические лучи наблюдались в 14 солнечных вспышках из списка LAT/FermiGRO.**

Публикация:

Струминский А. Наблюдения долготного распределения солнечных космических лучей в событиях 2012 г. Известия РАН. Серия физическая. № 5-6, 2015

#### **2.1.14. . Длительные изменения физических характеристик солнечных пятен,**

Рук Ю.А.Наговицын, ГАО РАН, nag@gao.spb.ru

##### **1. Две популяции солнечных пятен.**

С использованием 11 различных баз наземных и космических данных (в том числе Кисловодских данных и данных Пулковской базы «Каталога солнечной деятельности») показано, что значения площадей групп солнечных пятен образуют два надежно различающихся статистических распределения, наилучшим образом описываемых: логнормальным распределением – для крупных активных областей и распределением Вейбулла – для мелких. Наличие двух различных популяций пятен является косвенным свидетельством о действии на Солнце пространственно-разделенного динамо с двумя областями генерации – тахоклином (глубинный слой) и лептоклином (приповерхностный).

Публикации:

- Munoz-Jaramillo, Andres; Senkpeil, Ryan R.; Windmueller, John C.; Amouzou, Ernest C.; Longcope, Dana W.; Tlatov, Andrey G.; Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; Chapman, Gary A.; Cookson, Angela M.; Yeates, Anthony R.; Watson, Fraser T.; Balmaceda, Laura A.; DeLuca, Edward E.; Martens, Petrus C. H. Small-Scale and Global Dynamos and the Area and Flux Distributions of Active Regions, Sunspot Groups, and Sunspots: A Multi-Database Study, *Astrophysical Journal*, принято к печати (eprint arXiv:1410.6281).
- Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; Livingston, William C. On a Possible Explanation of the Long-term Decrease in Sunspot Field Strength // *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 758: L20, 5 pp. (2012).

##### **2. Артефакты SOHO MDI и свойства долгопериодических колебаний солнечных пятен**

Показано, что неучет движения пятна в картинной плоскости по пикселям MDI SOHO в вертикальном направлении приводит к обнаружению ложных периодов

долгопериодических колебаний магнитного поля пятен с периодами 700-1300 минут вблизи центрального меридиана. Таким образом, наблюдаемая мода колебаний, которую некоторые авторы считали предельной низкочастотной модой пятна, – артефакт. Предложен способ контроля этого артефакта с помощью вейвлет-преобразования, позволяющий исследовать периоды колебаний в диапазоне  $15 < T < 500$  минут. По наблюдениям 45 пятен получена экспериментальная картина зависимости частоты таких колебаний магнитного поля пятна от его напряженности. Картина имеет многомодовый характер с линейной предельной высокочастотной модой и не противоречит предыдущим данным наземных исследований.

Публикация:

Наговицын Ю.А., Рыбак А.Л. «Свойства долгопериодических колебаний пятен», АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, том 91, №5, с. 392–398, 2014.

## **Проект 2.2. Солнечный ветер**

**2.2.1. Численное и аналитическое решение задачи о взаимодействии солнечных магнитогидродинамических (МГД) быстрых ударных волн со структурами с постоянным давлением, типичными для солнечного ветра, и с магнитосферой Земли, приводящем к распаду произвольного разрыва.**

**Руководитель Гриб С.А. (ГАО РАН)**

**Постановка задачи.** Процесс лобового столкновения солнечной быстрой ударной волны с границей магнитного облака (МО) в виде тангенциального разрыва (Т) и с границей магнитной дыры (МД) рассматривается локально с переходом в систему координат, связанную с точкой пересечения МГД разрывов. Задача стационарна, автомодельна и плоскополяризована.

**Метод решения.** Рассмотрено столкновение солнечных ударных волн с границами МО и МД МГД методом пробного расчёта. При этом главное внимание обращено на физический смысл происходящих процессов. Сильные разрывы в солнечном ветре определяются МГД условиями динамической совместности, столкновение же разрывов в первом приближении рассматривается как распад произвольного разрыва в присутствии поперечного ММП. Для областей плазмы, находящихся между разрывными структурами, использован метод интегральных инвариантов. Получая комбинацию решений задачи о фронтальных взаимодействиях солнечных ударных волн с МО и с МД методом пробного расчёта с учётом выполнения условий эволюционности и учётом

распространения первой характеристики быстрой волны разрежения с эффективным числом Маха, равным единице, приходим к решению поставленной задачи.

### Основные результаты.

1. Взаимодействие солнечной быстрой ударной волны с границей магнитной дыры МД, являющейся частным случаем структуры с постоянным давлением, происходит во многом аналогично взаимодействию  $S$  с плотным магнитным облаком МО с образованием обратной ударной волны, отраженной от границы неоднородности.

2. МД в солнечном ветре ведёт себя во многом подобно плазмиду, в тоже время МО при взаимодействии с волной ведут себя подобно магнитосфере Земли.

3. Рассмотрено влияние вращательного разрыва при МО на стационарную магнитосферную головную ударную волну с образованием в магнитослое провала магнитного поля или плато за счёт действия вторичных медленных ударных волн.

4. Предложен новый механизм возникновения двух медленных разнонаправленных ударных волн  $S^*$  и неустойчивого контактного разрыва  $C$  от взаимодействия вращательного разрыва с ГУВ, что приводит к возникновению плато по плотности протонов в магнитослое.

Таким образом, в магнитослое может образоваться «плато», в котором плотность  $\rho$  возрастает, а магнитное давление  $P_b$  падает примерно в два раза (рис.1, слева – Солнце, справа - Земля).

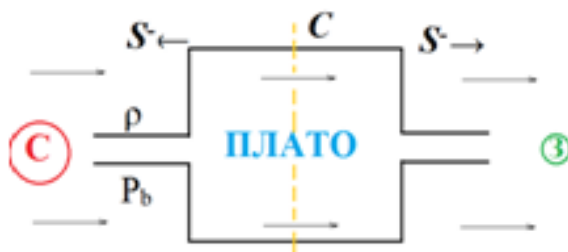


Рис.1

Полученные теоретические результаты согласуются с результатами космических наблюдений на аппаратах IMP – 6, Pioneer -6, - 8, Helios, Voyager – 2, WIND, Ulysses 3.

Список публикаций.

1. С.А.Гриб, С.Н.Леора. Магнитная дыра как плазменная неоднородность в солнечном ветре и связанные с ней возмущения межпланетной среды. IX ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 10-14 февраля, 2014, ИКИ РАН. Сб.тезисов. Москва, 2014, с.81.

2. *Grib S.A. and Leora S.N.* «Do the solar wind magnetic clouds and magnetic holes have much in common from the MHD point of view?». X International conference Problems of Geocosmos. Book of Abstracts. St.Petersburg, 2014, p.154.
3. *С.А.Гриб, С.Н.Леора.* Магнитные облака и магнитные дыры как типичные МГД структуры солнечном ветре. XVIII Всероссийская ежегодная конференция с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», Сб.тезисов, СПб, ГАО (Пулково), 2014, с.67.
4. *S.A.Grib, E.A.Pushkar'.* Can solar slow shock waves heat the corona? *Geom&Aer*, v.54, № 8, 2014, pp.991-995.
5. *С.А.Гриб, С.Н.Леора.* Магнитная дыра как плазменная неоднородность в солнечном ветре и связанные с ней возмущения межпланетной среды. *Геом. и аэр.* Т.55, № 2, 2015, 11 стр. (в печати)
6. *С.А.Гриб, С.Н.Леора.* Магнитные облака и магнитные дыры как типичные МГД структуры солнечном ветре. XVIII Всероссийская ежегодная конференция с международным участием «Солнечная и солнечно-земная физика 2014», СПб, ГАО (Пулково), 2014, 6 стр. (в печати)

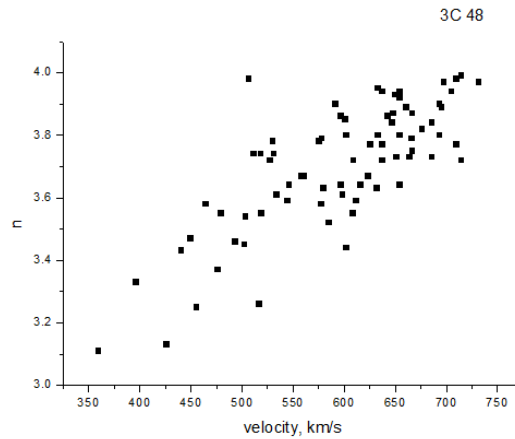
## **2.2.2.. Механизм ускорения солнечного ветра; физическая природа турбулентности солнечного ветра**

**Руководитель Чашей И.В.(ПРАО АКЦФИАН)**

### **1. Проанализированы временные спектры межпланетных мерцаний**

Проанализированы временные спектры межпланетных мерцаний сильного радиоисточников 3С 48 и 3С 298, наблюдавшихся в период вблизи минимума солнечной активности на частоте 111 МГц на радиотелескопе БСА ФИАН. Найдены указания на то, что показатель степени  $n$  в мелкомасштабной (масштабы порядка 100 км) области спектра флуктуаций плотности плазмы уменьшается при переходе из быстрого высокоширотного солнечного ветра в медленный низкоширотный.





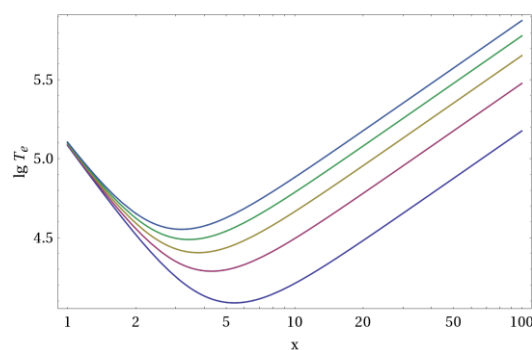
*Рис. 1. Зависимость показателя степени трехмерного спектра флуктуаций плотности от скорости солнечного ветра.*

Публикация

Глубокова С. К., Тюльбашев С. А., Чашей И. В., Шишов В. И. Параметры турбулентности межпланетной плазмы по наблюдениям сильного мерцающего источника 3C 48 вблизи минимума солнечной активности // Астрон. журн. Т.90. №8. С.639-647. 2013

## 2. Рассмотрен нагрев солнечного ветра

Рассмотрен нагрев электронов солнечного ветра при взаимодействии со слабыми ударными волнами. Показано, что в результате этого взаимодействия температура электронов оказывается существенно выше, чем в адиабатическом случае и может достигать значений  $10^5$  К и выше во внутренней окрестности гелиосферной ударной волны.



*Рис. 2. Расчетные зависимости температуры электронов от гелиоцентрического расстояния выраженного в а.е., масштаб логарифмический. Кривые соответствуют среднему расстоянию между ударными волнами 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1 а.е. сверху вниз. Степень сжатия в ударной волне принималась 1,1.*

Публикация

### **2.2.3. Закономерности формирования и ускорения солнечного ветра по данным его радиозондирования сигналами заходящих за солнце космических аппаратов** **Руководитель Ефимов А.И. (ФирЭ РАН)**

Анализируются данные двухтрассового двухчастотного радиозондирования околосолнечной плазмы, полученные с помощью космических аппаратов (КА) MARS EXPRESS, ROSETTA, VENUS EXPRESS (2004-2013 гг.). При проведении экспериментов наземный комплекс излучал в сторону КА сигнал X-диапазона, стабильность частоты которого обеспечивалась водородным стандартом. На КА формировались и излучались в сторону Земли когерентные между собой сигналы S- и X-диапазонов.

Выполнен теоретический анализ закономерностей радиозондирования солнечного ветра по новой схеме, который показал, что основной вклад (99%) в флуктуации частоты сигнала S-диапазона, принимаемого на наземном пункте, вносит плазма на Трассе *КА-Наземный пункт*. Флуктуации X-диапазона обусловлены обеими трассами: *Наземный пункт-КА* и *КА-Наземный пункт*. Получена формула для отношения интенсивностей флуктуаций частоты в S-диапазоне к интенсивности в X-диапазоне. Предложена методика определения степени корреляции флуктуаций частоты на обеих трассах, времени смены неоднородностей плазмы и внешнего масштаба турбулентности.

Приведены спектры флуктуаций частоты S-диапазона, X-диапазона и дифференциальной частоты. Предложена методика, позволяющая из совокупности временных спектров определять радиальные зависимости интенсивности флуктуаций частоты. По данным измерений в экспериментах с КА MARS EXPRESS и ROSETTA, проведенных в 2010-2011 гг., были обнаружены 6 событий, характеризующиеся сильным увеличением интенсивности флуктуаций частоты по сравнению с фоновым уровнем. Разница во времени между событиями такова, что наблюдаемые эффекты можно объяснить влиянием одной и той же коротирующей структуры, которая вращается вместе с Солнцем с синодическим периодом 27 суток. Время существования такой структуры превышало 148 суток (5.5 синодических периодов).

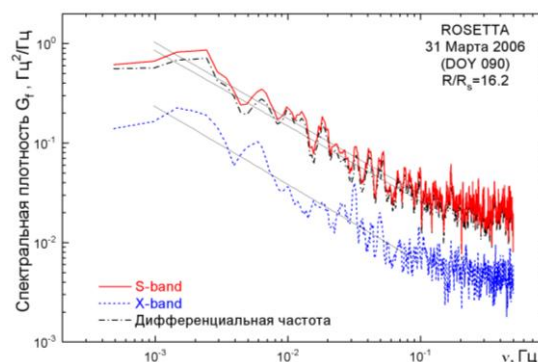


Рис. 1. Временные спектры флуктуаций частоты S-диапазона (красный цвет), X-диапазона (синий цвет) и дифференциальной частоты (черный цвет).

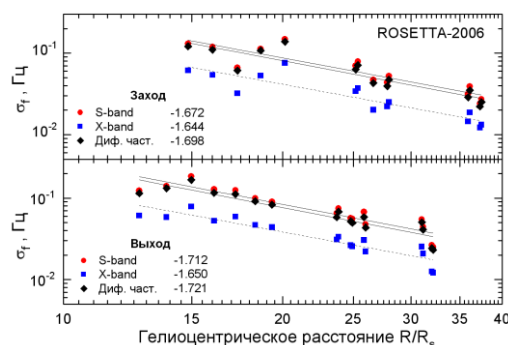


Рис. 2. Радиальная зависимость среднеквадратичных значений флуктуаций частоты: S-диапазон (кружки), X-диапазон (квадраты), дифференциальная частота (ромбы)

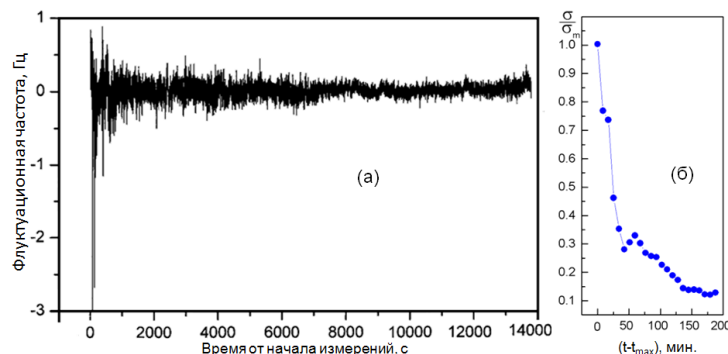


Рис. 4. Обнаружение корототирующих структур.

(а) – флуктуации дифференциальной частоты. Измерения 31.12.2010, MARS EXPRESS;  
(б) – усредненные значения по 2048 отсчетам.

Публикации:

1. Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Rudash V.K., Chashei I.V., Bird M.K, Pätzold M., MEX-VEX-ROS Radio Science Team. Two-way frequency fluctuations observed during coronal sounding experiments // Solar Physics. 2014. V. 289. № 5. P. 1715-1729.
2. Efimov A.I., Lukanina L.A., Samoznaev L.N., Rudash V.K., Chashei I.V., Bird M.K, Pätzold M. Coronal radio sounding experiments with ROSETTA and MARS EXPRESS during

solar conjunctions in 2010/2011 // 40th COSPAR Scientific Assembly 2014, Russia, Moscow, 2-10 August 2014. Сб. абстрактов E2.6-0022-14.

3. Efimov A.I., Lukanina L.A., Rogashkova A.I., Samoznaev L.N., Chashei I.V., Bird M.K., Pätzold M. Coronal sounding experiments over the solar activity cycle with HELIOS-1 and HELIOS-2: Faraday rotation observations of alfvén waves in the region of solar wind acceleration // 40th COSPAR Scientific Assembly 2014, Russia, Moscow, 2-10 August 2014. Poster E2.2-0059-14.

4. 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 (принято к печати).

#### **2.2.4. Долговременные вариации потоков солнечного корпускулярного излучения.**

**Руководитель Ануфриев Г.С. (ФТИ РАН)**

##### **1. Определение солнечно-ветровых потоков и возраста колонки лунного грунта, доставленной американской миссией «Аполлон 11».**

Лунный грунт (реголит) формируется в результате длительного непрерывного воздействия на лунную поверхность комплекса космогенных факторов: (микро)метеоритной бомбардировки и облучения солнечными и галактическими космическими лучами. Кроме того, одновременно происходит тепловое разрушение и измельчение лунных пород в результате суточных колебаний температуры от  $+120^{\circ}\text{C}$  днем до  $-170^{\circ}\text{C}$  ночью. Реголит был доставлен на Землю советскими автоматическими станциями в 1970 – 1976 гг., а также американскими (США) миссиями Apollo в 1969 – 1972 гг. [1]. Основное направление, проведенных после доставки грунта исследований, носит явно выраженный геологический приоритет. Принципиальное отличие лунного грунта от пород земной коры состоит в том, что лунный грунт содержит ионы солнечного ветра как результат непрерывного воздействия солнечного корпускулярного излучения. Таким образом, появляется возможность получить информацию о долговременных вариациях солнечных потоков. Эта возможность впервые была реализована в работах [2,3]. Предложенный метод датирования и проведенные исследования [2,3] вариаций концентраций солнечного гелия в образцах колонок грунта из морских регионов Луны, доставленных автоматическими станциями (АС) Луна-16 и -24, позволили установить возраст доставленного лунного грунта и связать всплески концентрации гелия с активизацией процесса выброса солнечной корональной массы

(CME). Спутниковые исследования [4] показали, что этот процесс (CME) сопровождается повышением обилия гелия («гелиевая активность») в солнечном потоке до 30% (относительно водорода) в то время как быстрые и медленные квазистационарные компоненты солнечного ветра (CH и IS) содержат гелия только около 5%. Обнаруженные и датированные сильные вариации концентрации гелия в лунном грунте отечественных колонок [2,3] позволяют сопоставить эти наблюдения с обнаруженными высокими концентрациями гелия [5] в американской колонке (Аполлон 11), отобранной также из Морского региона (Моря Спокойствия), и убедительно засвидетельствовать наличие в лунном реголите памяти о древних солнечных CME-процессах. Применение предложенного нами метода [2,3] датирования позволило впервые рассчитать кинетический параметр – скорость накопления реголита  $a = 0.17$  см/ $10^6$  лет в регионе высадки миссии Аполлон 11 а также впервые провести датировку доставленной американцами колонки (идентификационный номер 10004, длина 13,5 см) грунта [5]. Проведенный расчет показал, что возраст колонки составляет 80 миллионов лет.

## **2. Долговременные вариации потоков гелия и протонов на интервале вплоть до 600 млн. лет назад и солнечно-земные связи, палеоклимат.**

Исследования последних лет показали существование долговременных вариаций климата, нашедших объяснение в рамках солнечно-земных связей. Однако одновременно с влиянием Солнца на Землю существует влияние “космоса”. Поэтому прямым подтверждением проявления солнечно-земных связей может служить наличие долговременной изменчивости солнечных корпускулярных потоков. Возможность установить такие связи появляется на основе выявленных вариаций потоков солнечного ветра с возрастом от современного уровня до уровня ~ 600 млн. лет назад [1]. В работе [2] сделана попытка обнаружения долговременной периодичности солнечного корпускулярного излучения. Обнаруженная в некоторых образцах лунного грунта повышенная концентрация солнечного гелия (относительно среднего уровня) вероятнее всего вызвана “памятью” грунта о потоках, вызванных извержениями солнечной корональной массы (CME). Получено, что вариации потока протонов на интервале времени ~600 млн. лет составляют менее 30%, а вариации потока гелия отклоняются от среднего значения в 1.5–2 раза. Доля потока протонов, вызванных процессом извержения солнечной корональной массы (CME), составляет менее 20% от общего (валового) потока протонов, в то время как доля потока гелия процесса CME в среднем составляет 50% от общего гелиевого потока. Получено, что поток гелия имеет два

всплеска интенсивности  $\sim 70$  и 470 млн. лет. Равенство интенсивностей всплесков указывает на проявление долговременной “стационарной” черты функционирования Солнца. С учетом выявленной ранее цикличности солнечной активности [3] появляется основание предполагать, что обнаруженные всплески являются фрагментом цикличной солнечной активности в прошлом с периодом  $\sim 400$  млн. лет. Таким образом, на протяжении времени существования солнечной системы их было  $\sim 10$ . Исследования показали, что повышенная гелиевая активности Солнца (активизации СМЕ процессов) существует и в современную эпоху. Всплеск интенсивности солнечных потоков протонов и гелия  $\sim 70$  млн. лет назад, вероятно, находит отражение в утолщении колец древних деревьев согласно данным [4]. Однако возраст деревьев составляет обычно десятки и сотни лет, в то время как обнаруженные увеличения солнечных потоков (солнечной активности) составляют миллионы лет. Главной причиной кажущегося противоречия является малая скорость накопления реголита в доставленных колонках грунта и редкий отбор проб грунта, разнесенных по возрасту на миллионы лет, что при линейной интерполяции результатов механически исключает из наблюдения существующие более быстрые вариации потоков. При использованном отборе лунных проб *in situ* удастся наблюдать только “огibaющую” сравнительно быстрых вариаций солнечного ветра. Полученные результаты позволяют также продлить интервал времени, в течение которого активность Солнца в далеком прошлом может быть сопоставлена с земными свидетельствами вариаций палеоклимата.

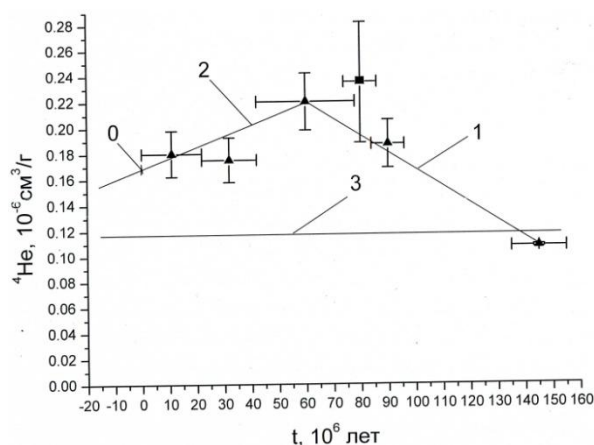


Рис.1. Вариация во времени концентраций гелия в исследованных коротких (35 и 13,5 см) колонках реголита. Отрезками прямых 1 и 3 показана возможная интерполяция промежуточных значений концентрации гелия (восходящая 1 и нисходящая 3 ветви интерполяции). Отрезком горизонтальной прямой 2 отмечен уровень средней величины ( $0,121 \text{ см}^3/\text{г}$ ) концентрации гелия по всем исследованным образцам колонок грунта.

Точка 0 отмечает концентрацию гелия  $0,16 \text{ см}^3/\text{г}$  в современную эпоху ( $t=0$ ), что существенно больше средней величины всех измеренных концентраций. Это подтверждает наличие «гелиевой активности» Солнца в современную эпоху. Символы обозначают:  $\blacktriangle$  - концентрация гелия в образцах «Луна-16»;  $\blacksquare$  - концентрация гелия в образце «Аполлон 11».

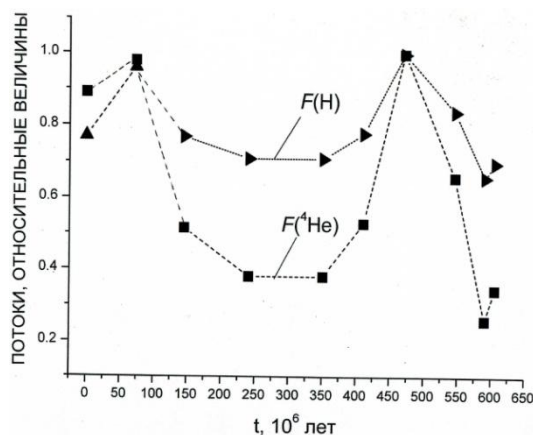


Рис.2. Полученные потоки гелия  $F(\text{He})$  и протонов  $F(\text{H})$  в относительных величинах на временном интервале 0 – 600 миллионов лет назад. Нормировка сделана по максимальным значениям потоков:  $F(\text{H})_{\text{max}} = 3,23 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ;  $F(\text{He})_{\text{max}} = 22,3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Публикации

1. Ануфриев Г.С. Лунный грунт как хранитель информации о древнем солнечном излучении. 9-ая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе».2014. ИКИ. РАН. //Сборник тезисов. С.87.
2. Ануфриев Г.С. Вариации солнечных потоков гелия и протонов на длительной шкале времени // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т.54. № 6. С. 730-737

## 2.2.5. Влияние крупномасштабного магнитного поля на формирование короны и солнечного ветра.

Руководитель Тлатов А.Г. (ГАО РАН)

### 1. Свойства солнечных пятен ведущей и хвостовой полярности за период около 100 лет.

Выполнена оцифровка магнитных полей солнечных пятен обсерватории Mount Wilson в период 1917-2013 гг. Создана база данных, которая включает координаты, площадь и величину магнитного поля ядер солнечных пятен и пор. Изучены долговременные вариации магнитных полей пятен. Показано, что долговременные тренды напряженности магнитных полей пятен зависят от их размера. Эти данные

использованы для анализа свойств магнитных полей пятен ведущей и хвостовой полярности.

В частности установлено, что пятна ведущей полярности имеют более сильные магнитные поля.

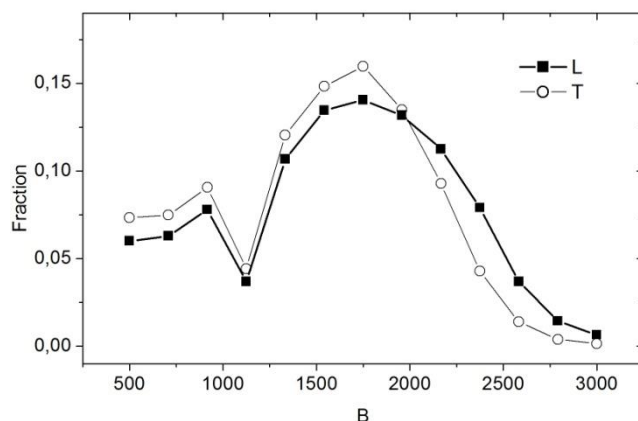


Рис. 1.1: Гистограмма распределения относительного числа пятен ведущей (L) и хвостовой полярности от напряженности магнитного поля по данным наблюдений обсерватории Маунт Вилсон в период 1917-2013 гг.

Публикации:

Tlatov A. G., K.A. Tlatova, V.V. Vasil'eva, A.A. Pevtsov, K. Mursula, Properties of sunspot umbrae of leading and trailing polarity in 1917-2013, *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.05.033>, 2014

## 2. Долговременные вариации индексов солнечной активности: от фотосферы до солнечной короны.

Выполнен обзор долговременных вариаций солнечной активности по различным индексам, характеризующим активности на различных высотах солнечной атмосферы от фотосферы, хромосферы и солнечной короны. Каждый из индексов был проанализирован с точки зрения физических механизмов формирования и использования для описания солнечной активности. Показано, что индексы крупномасштабного магнитного поля опережают индексы активности, регистрируемые на уровне фотосферы и солнечной короны.



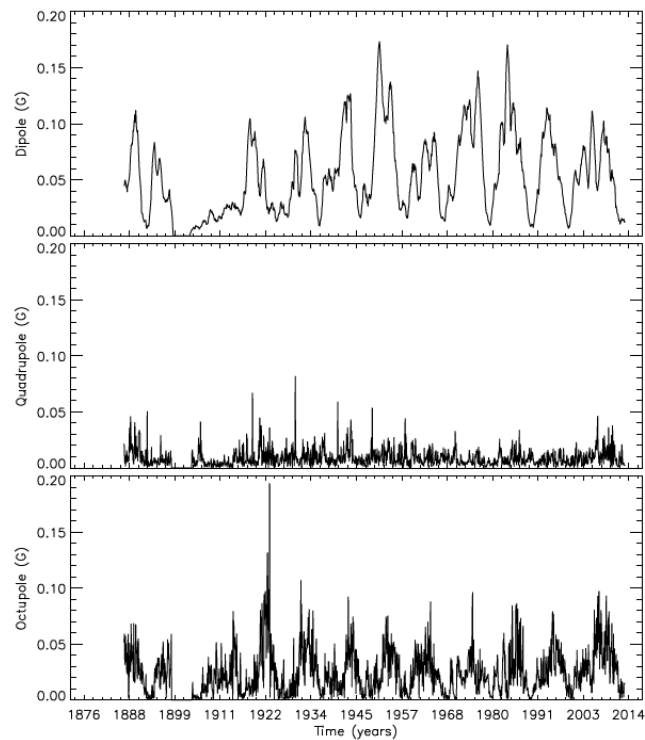


Рис.2.1. Индексы крупномасштабного магнитного поля, сформированные для синоптических оборотов Солнца. Индексы получены при разложении топологии крупномасштабного магнитного поля по сферическим гармоникам: диполя, квадруполя и октуполя. Данные получены на основе наблюдения Горной станции ГАО, обсерваторий Медон, Кодайканал и Сакраменто Пик.

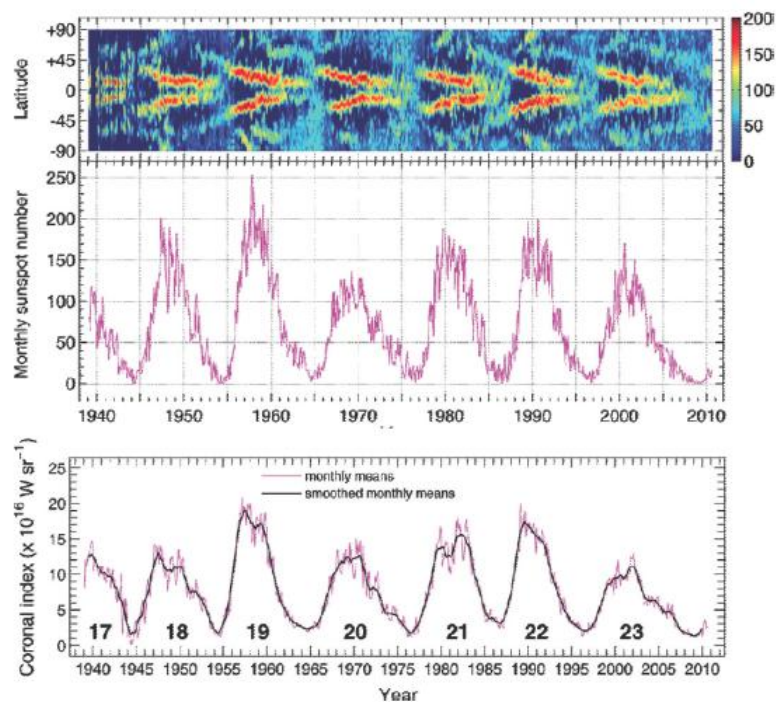


Рис. 2.2. Изменение активности солнечной короны по данным наблюдений в линии Fe XIV 530.3 и активности солнечных пятен (средняя панель)

Публикации:

Ermolli, Ilaria; Shibasaki, Kiyoto; Tlatov, Andrey; van Driel-Gesztelyi, Lidia, Solar Cycle Indices from the Photosphere to the Corona: Measurements and Underlying Physics, Space Science Reviews, 2014, 10.1007/s11214-014-0089-8

### 3. Бимодальный характер физических свойств солнечных пятен

Рассмотрены свойства солнечных пятен на основе данных наблюдения космической обсерватории SDO. Разработана программа автоматического выделения границ полутени и ядер солнечных пятен. По данным HMI/SDO в период 05.2010-09.2012 гг. выполнено совмещение границ ядер и полутени магнитограммах, полученных в тот же момент, и проведены соответствующие измерения напряженности магнитного поля и поля поля скорости. Показано, что солнечные пятна малого ( $S < 20$  мдп) и большого ( $S > 100$  мдп) размера имеют различные интенсивности магнитных полей.

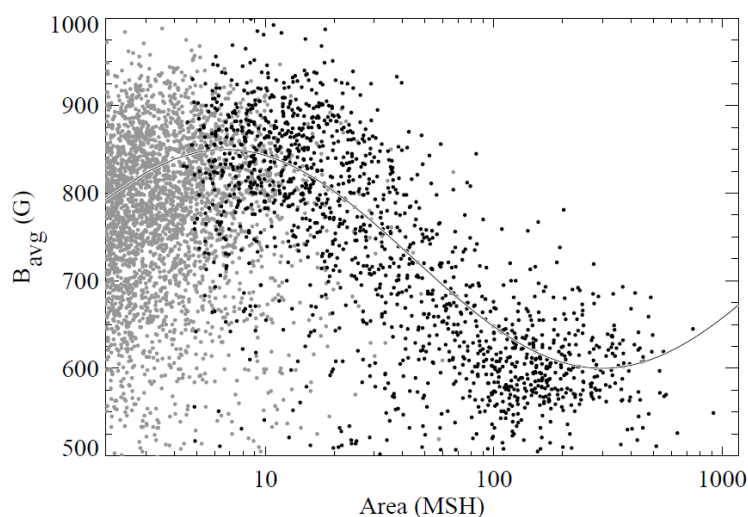


Рис. 3.1. Распределение средней напряженности магнитного поля в солнечных пятнах в зависимости от их размера.

Публикации:

Tlatov, A.; Pevtsov, A. A., Bimodal Distribution of Magnetic Fields and Areas of Sunspots, Solar Physics, V. 289, Issue 4, pp.1143-1152, 2014

### 4. Смена режима солнечной цикличности

В настоящее время произошла смена режима цикличности солнечной активности. Анализ групп солнечных пятен с 1610 года по настоящее время показал, что правило Гневывшева-Оля (G-O) имеет циклы обращения с периодом 200 лет. В Хейловской паре циклов N22-23 произошло очередное обращение правила (G-O). В нескольких последующих парах нечетные циклы могут быть слабее предшествующих четных циклов. Различие четных и нечетных циклов происходит вследствие существования

добавочного магнитного поля. На основе различия характеристик пятен по широте в четных и нечетных циклах. Выполнена оценка величины такого поля, составляющая около 5% от динамо поля.

Установлено, что вековые минимумы активности происходят вблизи экстремумов 200-летних циклов обращения правила G-O. Пик следующего векового минимума ожидается в период 2020-2030 годов. Показано что при среднем числе групп в цикле около  $G_n \sim 4$  меняются условия режима перехода от слабых циклов к более сильным циклам, и наоборот (Рис. 4.1).

Изучено изменение физических параметров солнечных пятен в цикле Глайсберга. Показано что на фазе максимума цикла Глайсберга наблюдается максимум средней площади групп, среднего числа пятен в группах.

Выполнен прогноз 25-го цикла активности. Ожидается, что амплитуда цикла 25 будет несколько меньше цикла 24. На основе о данных переполюсовке крупномасштабного магнитного поля Солнца в 24-м цикле прогноз 25-го цикла активности составил  $Ri_{25}^{\max} = 68(\pm 13)$  (Рис. 4.2).

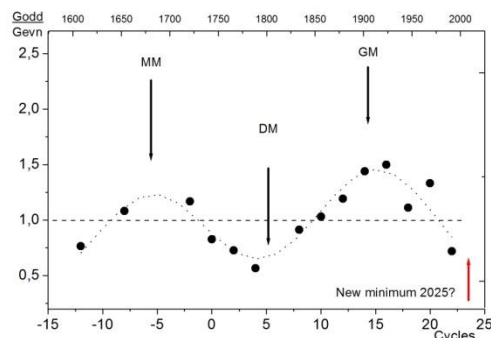
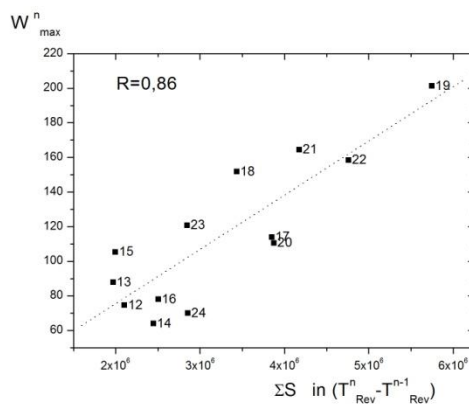


Рис. 4.1 Отношение для пар  $G^{odd}_{n+1}/G^{ev}_n$ . Проведена линия, где  $G^{odd}_{n+1}/G^{ev}_n = 1$  и положение вековых минимумов активности.



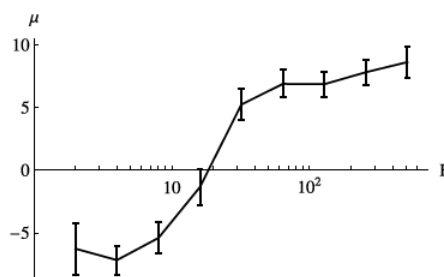
**Рис. 4.2.** Связь между кумулятивной суммой площадей солнечных пятен в северном полушарии, отсчитываемых в интервал времени  $T_{min} \div T_{rev}$  и амплитудой следующего цикла активности.

Публикации:

- 1) Tlatov A. G., The change of the solar cyclicity mode, *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.024>, 2014
- 2) Tlatov A. G., LongTerm Variations in Solar Activity and a Fossil Solar Magnetic Field, ISSN 0016, 7932, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 7, pp. 899–902. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014.

## 5. Исследование свойств магнитных биполей различного масштаба.

Выполнен анализ свойств магнитных биполей большого размера (биполи солнечных пятен) в сравнение с свойствами биполей малого размера (эфемерные области) по данным магнитографических наблюдений в период 1975-2013 гг. Детальное сравнение физических свойств биполей разного размера показало, что биполи малого (<300 мдп) и большого размера имеют различную ориентации магнитной оси и различное распределения по широте и времени в солнечном цикле.



**Рис. 5.1** Изменение угла направления магнитной оси биполей в зависимости от их магнитного потока.

Публикации:

- 1) Illarionov, E.; Tlatov, A.; Sokoloff, D. The Properties of the Tilts of Bipolar Solar Regions, *Solar Physics*, 2014, 10.1007/s11207-014-0612-9
- 2) Ermolli, Ilaria; Shibasaki, Kiyoto; Tlatov, Andrey; van Driel-Gesztelyi, Lidia, *Solar Cycle Indices from the Photosphere to the Corona: Measurements and Underlying Physics*, *Space Science Reviews*, 2014, 10.1007/s11214-014-0089-8
- 3) Tlatov, A. G.; Vasil'eva, V. V.; Makarova, V. V.; Otkidychev, P. A. Applying an Automatic Image-Processing Method to Synoptic Observations, *Solar Physics*, V.289, Issue 4, pp.1403-1412, 2014-11-22.

- 4) Tlatov, A.; Pevtsov, A. A., Bimodal Distribution of Magnetic Fields and Areas of Sunspots, *Solar Physics*, V. 289, Issue 4, pp.1143-1152, 2014
- 5) Pevtsov, A. A.; Bertello, L.; Tlatov, A. G.; Kilcik, A.; Nagovitsyn, Y.A.; Cliver, E. W., Cyclic and Long-Term Variation of Sunspot Magnetic Fields, *Solar Physics*, V. 289, Issue 2, pp.593-602, 2014
- 6) Tlatov A. G., The change of the solar cyclicity mode, *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.024>, 2014
- 7) Tlatov A. G., K.A. Tlatova, V.V. Vasil'eva, A.A. Pevtsov, K. Mursula, Properties of sunspot umbrae of leading and trailing polarity in 1917-2013, *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2014.05.033>, 2014
- 8) Tlatov A. G., LongTerm Variations in Solar Activity and a Fossil Solar Magnetic Field, ISSN 0016, 7932, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 7, pp. 899–902. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014.
- 9) A.s Muñoz-Jaramillo, R. R. Senkpeil, J. C. Windmueller, E. C. Amouzou, D. W. Longcope, A. G. Tlatov, Y. A. Nagovitsyn, A. A. Pevtsov, G. A. Chapman, A. M. Cookson, A. R. Yeates, F. T. Watson, L. A. Balmaceda, E. E. DeLuca, P. C. H. Martens, 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*, принято в печать.
- 10) 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.*, 2014, 10.1007/s11207-014-0605-8
- 11) P A Otkidychev and N N Skorbezh, The Peculiarities Of The Initial Phase Of The 24-th Solar Activity Cycle *Journal article*, 2013 1742-6596 461 012011 doi:10.1088/1742-6596/461/1/012011

#### **2.2.6. Исследование источников солнечного ветра и классификация на основе наблюдаемой топологии, теоретических моделей и безразмерного масштабного анализа основных физических параметров**

**Руководитель Веселовский И.С. (ИКИ РАН)**

Исследованы источники солнечного ветра и секторной структуры межпланетного магнитного поля во время переполюсовки магнитного поля Солнца в начале 24-го солнечного цикла по данным солнечной обсерватории имени Вилкокса, наблюдений на космических аппаратах ACE и SDO/AIA. Установлено преобладание квадрупольной гармоник в крупномасштабном магнитном поле Солнца и соответствующей этому

четырёхсекторной структуры межпланетного магнитного поля. Основным источником солнечного ветра на орбите Земли была большая трансэкваториальная корональная дыра отрицательной полярности, сильно эволюционировавшая в процессе переполюсовки общего магнитного поля Солнца. Вклад транзитных высокоскоростных потоков от межпланетных корональных выбросов массы в быстрый солнечный ветер в 2012 г. не превосходил 17%. Среднегодовая плотность потока солнечного ветра составляла  $1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и была ниже типичных за многие годы значений в 2-4 раза. На долю медленного солнечного ветра приходилось более 68% потока, на долю быстрого – от 10 до 32 % за кэррингтоновский оборот. Подобные значения объясняются слабой солнечной активностью.

Публикации:

1. Yulia Shugay, Vladimir Slemzin and **Igor Veselovsky**. Magnetic field sector structure and origins of solar wind streams in 2012. [J. Space Weather Space Clim., 4 \(2014\) A24.](https://doi.org/10.1051/swsc/20140212) doi:<http://dx.doi.org/10.1051/swsc/20140212>.
2. Dmitriev, A. V.; Suvorova, A. V.; Chao, J.-K.; Wang, C. B.; Rastaetter, L.; Panasyuk, M. I.; Lazutin, L. L.; Kovtyukh, A. S.; **Veselovsky, I. S.**; Myagkova, I. N. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm. Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 119, Issue 2, pp. 877-896, 2013. DOI: [10.1002/2013JA019534](https://doi.org/10.1002/2013JA019534)

## **Проект 2.3. Солнечно-земные связи**

**2.3.1. Исследование турбулентности солнечного ветра и магнитослоя с рекордно высоким временным разрешением Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли.**

**Руководитель Застенкер Г.Н. (ИКИ РАН)**

В течение 2014 г. продолжалось интенсивное проведение эксперимента Плазма-Ф, осуществляемого на запущенном в 2011 г. высокоапогейном спутнике Спектр-Р.

Основой этого эксперимента являются:

- проведение измерений параметров плазмы солнечного ветра и магнитослоя с помощью энергоспектрометра плазмы - прибора БМСВ, имеющего рекордно высокое временное разрешение – до 31 миллисекунды;
- проведение измерений потоков энергичных частиц с помощью прибора МЭП, имеющего высокие временное и энергетическое разрешение.

В результате этих измерений продолжает регулярно получаться большой объем высококачественных данных, анализ которых позволяет выявить новые и важные сведения о солнечном ветре.

Эти измерения проходят практически непрерывно за исключением тех периодов в ноябре-декабре и январе-феврале каждого года, когда орбита спутника находится в магнитослое или в хвосте магнитосферы Земли и солнечный ветер не регистрируется.

Всего за 2014 год было проведено более 600 сеансов связи с передачей на Землю записанных в системе ССНИ эксперимента «Плазма-Ф» данных приборов БМСВ и МЭП.

Затем эти измерения в ИКИ РАН подвергались очистке от сбоев, привязке по времени, экспресс-обработке с визуализацией и первичной обработке. Всего на выходе процессов первичной обработки было получено за год около 180 гигабайт данных этих приборов.

Материалы первичной обработки использовались в процессе вторичной обработки, которая, в частности, позволяла получать такие параметры плазмы, как :

- значения вектора потока (величины и углов его направления) с разрешением в 31 мс;
- энергетические спектры потока ионов,
- значения переносной скорости, температуры и плотности протонов,
- значения содержания и плотности, а также (для отдельных моментов) относительной скорости дважды ионизованных ионов гелия (альфа-частиц) – все с разрешением в 3 с.

Анализ данных вторичной обработки, как уже указывалось в нашем отчете за 2013 г., позволил получить новые сведения относительно структуры и поведения основных параметров солнечного ветра.

В ходе работ по проекту 2.2 в 2014 г. были продолжены детальные исследования по следующим разделам:

## **2 . Изучение быстрой изменчивости мелкомасштабной структуры потока ионов солнечного ветра.**

Продолжено систематическое изучение вариаций величины и направления потока ионов солнечного ветра, измерявшихся с высоким временным разрешением. При этом основное внимание обращалось на регистрацию быстрых вариаций направления потока ионов.

Было выявлено, что наряду с вариациями полярного угла потока ионов с периодом порядка минуты иногда встречаются и участки солнечного ветра, в которых вариации

его направления происходят за несколько секунд или даже меньше. Пример такого поразительного события приведен на Рис.1.

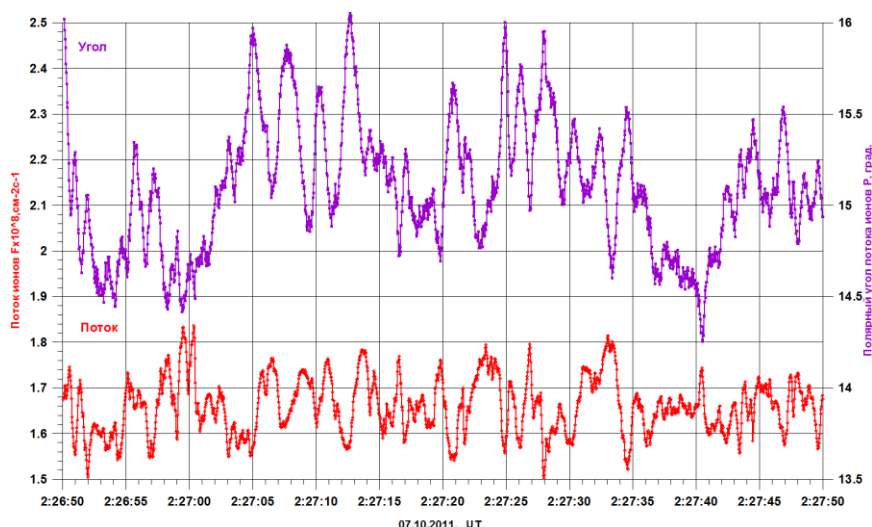


Рис.1

На этом рисунке показаны вариации полярного угла (с амплитудой 0.2-0.5 град.) и потока ионов (с амплитудой около 10%) солнечного ветра, имеющие длительности около 1 сек. (и даже меньше).

Проведенные исследования показали, что такие события могут встречаться в областях типа «форшока».

Другое важное обстоятельство заключается в том, что вариации азимутального угла вектора потока ионов оказываются заметно более медленными, чем вариации его полярного угла – азимутальные углы, как правило, сохраняют свое относительное постоянство в пределах десятка градусов на интервалах в несколько часов.

Статья: «Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра» авторов Г.Н. Застенкера, В.В. Храпченкова, И.В. Колосковой и др. послана в печать (журнал «Космические исследования»).

### 3. Анализ спектральных свойств вариаций параметров солнечного ветра.

Продолжено изучение турбулентности солнечного ветра – величины потока и углов его направления с временным разрешением 31 мс и таких его параметров как переносной скорости и плотности ионов с временным разрешением 3 с. и выполнен спектральный анализ этих данных в соответствующем диапазоне частот.

Полученный частотный спектр вариаций, представленный в качестве примера на рис.2а,б, для потока ионов четко разделяется на две ветви – НЧ и ВЧ (см.Рис.2а), граница между которыми соответствует границе между инерциальным и диссипативным



режимами флуктуаций, а для плотности ионов (см.Рис.2б) разделяется на три области – НЧ и ВЧ, между которыми находится почти плоская область с малым наклоном спектра. Эти области по измерениям плазмы найдены впервые.

Для вариаций величины потока граница двух ветвей находится, в среднем, на частоте около 1.4 Гц, а для вариаций плотности границы трех областей находятся на частотах примерно 0.1 Гц и 1.0 Гц. (см. Рис.2). Спектральные индексы для этих областей указаны для данного примера на Рис.2.

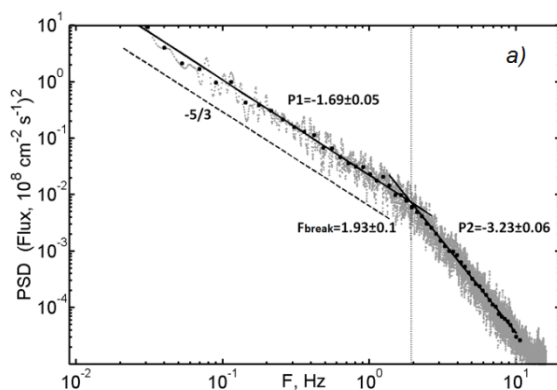


Рис.2а

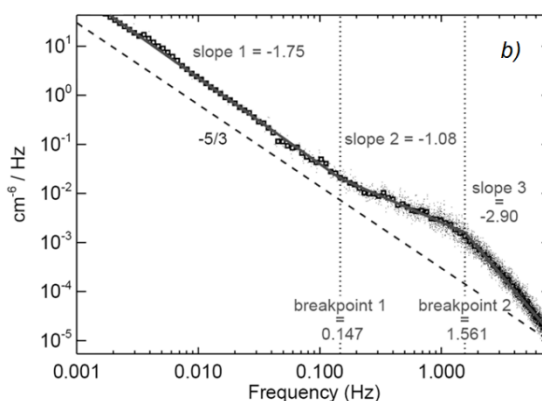


Рис.2б

Указанные результаты и другие новые данные о турбулентности параметров солнечного ветра, полученные в нашем эксперименте с прибором БМСВ на спутнике Спектр-Р, содержатся в статье: “ Dynamic properties of small scale solar wind plasma fluctuations” by authors M. O. Riazantseva, V. P. Budaev , G. N. Zastenker, L. M. Zelenyi, G. P. Pavlos, J. Safrankova, Z. Nemecek, L. Prech and F. Nemec, направленной для опубликования в журнал Phyl. Trans. Royal Soc.

#### 4. Определение структуры, длительности и протяженности фронтов межпланетных ударных волн.

Продолжалось изучение тонкой структуры плазмы солнечного ветра на фронтах межпланетных ударных волн на основе данных энергоспектрометра плазмы БМСВ.

Хотя длительности таких фронтов по вариациям магнитного поля СВ были примерно оценены, измерить эту длительность по изменениям параметров плазмы до наших экспериментов еще не удавалось из-за недостаточности временного разрешения.

Наши измерения с рекордным временным разрешением в 31 мс позволили впервые исследовать тонкую структуру плазменных фронтов межпланетных ударных волн и установить, что они имеют длительности от долей секунды до нескольких секунд. При этом было показано, что некоторые из таких фронтов сопровождаются осцилляторными

(квазигармоническими) вариациями величины и направления потока ионов с периодами в диапазоне 0.2-1.0 секунды (см.Рис.3а).

Для некоторого набора квази-перпендикулярных межпланетных ударных волн было осуществлено (также впервые) определение толщины фронта на основе измеренной длительности его прохождения мимо космического аппарата. и оценки скорости движения этих ударных волн по данным о их прохождении через несколько достаточно широко расставленных аппаратов. При этом были получены оценки толщины фронта в 60-450 км (см. Рис.3б) при среднем значении около 200 км.. Эти толщины по порядку величины приблизительно соответствуют 3-4 гирорадиусам протонов для значения их тепловой скорости перед фронтом.

По этим результатам готовится статья для журнала «Космические исследования»

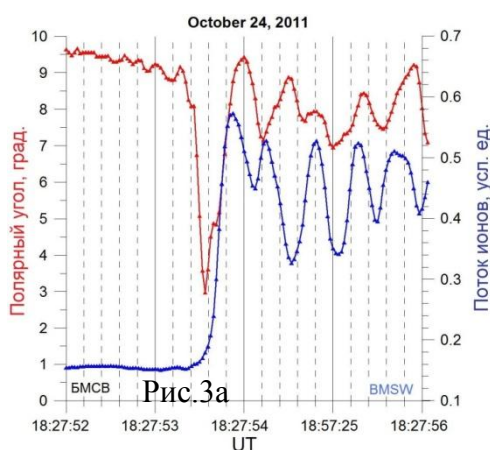


Рис.3а

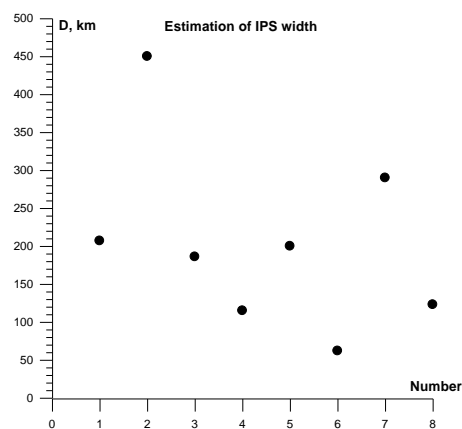


Рис.3б

## 5. Изучение быстрых вариаций относительного содержания и скорости ионов гелия в солнечном ветре.

Спектрометр БМСВ, данные которого используются в наших исследованиях, не имеет устройства для масс-селекции, однако его высокое энергетическое разрешение позволяет проводить анализ измерявшихся permanently энергетических спектров ионов солнечного ветра по величине энергии на заряд. Такой анализ дает возможность при определенных условиях разделить энергетический спектр ионов на две явно выраженных составляющие – спектры протонов и спектры дважды ионизованных ионов гелия. Тем самым была реализована возможность систематического изучения с высоким временным разрешением вариаций содержания и (несколько менее детально) относительной скорости ионов гелия в солнечном ветре.

При этом впервые было установлено, что в отличие от прежних работ, представлявших, в основном, усредненные на больших интервалах величины (среднечасовые или среднесуточные), относительное содержание в солнечном ветре ионов гелия (т.е.

отношение  $\text{Na/Np}$ ) может варьироваться в весьма широких пределах (от 1-2 процентов до 10-15 процентов) за весьма малые времена (см. пример на Рис.4). Детальное рассмотрение показывает, что такие быстрые вариации  $\text{Na/Np}$  происходят на интервалах в десяток секунд и даже в несколько секунд.

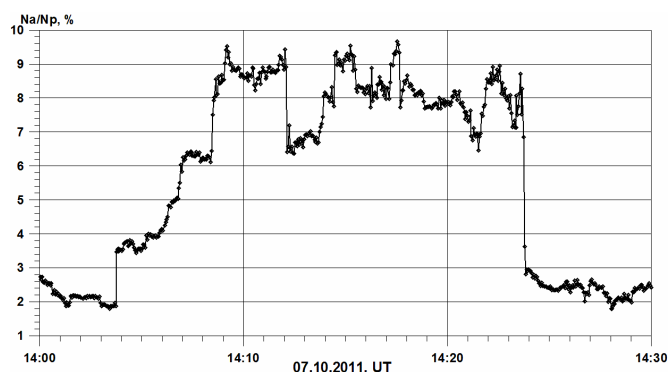


Рис.4

Полученные данные позволяют выдвинуть гипотезу о мелкой «зернистости» солнечной короны в части содержания ионов гелия в области формирования солнечного ветра.

По этим результатам опубликована статья в журнале «Космич. исслед.» №1, 2014 г.:

Г.Н. Застенкер, И.В. Колоскова, М.О. Рязанцева и др., «Быстрые вариации содержания ионов гелия и их скорости относительно протонов в солнечном ветре».

#### **6. Исследование отклика магнитосферы на резкие скачки давления солнечного ветра.**

Была продолжена работа по рассмотрению различных явлений в магнитосфере, вызываемых приходом резкого возмущения давления солнечного ветра, связанного, например, с приходом межпланетной ударной волны. В частности, при анализе свойств внезапного начала геомагнитного возмущения (SC) был обнаружен предвестник этого начала в виде глобально регистрируемого широкополосного электромагнитного импульса в частотном диапазоне  $0.2 \div 7$  Гц. Пример такого события показан на Рис.2, где даны записи скачка потока ионов, измеренного на спутнике Спектр-Р, скачка межпланетного магнитного поля, измеренного на спутнике Кластер-2, и возмущения геомагнитного поля (модуля и одной компоненты) на станции Ловозеро. Видно, что перед внезапным началом в компоненте геомагнитного поля наблюдается осциллирующая вариация низкой частоты и довольно высокой амплитуды.

Предполагается, что такой импульс может быть следствием фильтрующего действия ионосферных альвеновских резонаторов на МГД волны, генерируемые при контакте межпланетной ударной волны с магнитопаузой.

Эти результаты представлены в статье: «Импульсные всплески геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2-7 Гц, как первый сигнал о взаимодействии МУВ с магнитосферой» авторов Пархомов В.А., Довбня Б.В., Бородкова Н.А. и др., направленной в журнал «Солнечно-земная физика».

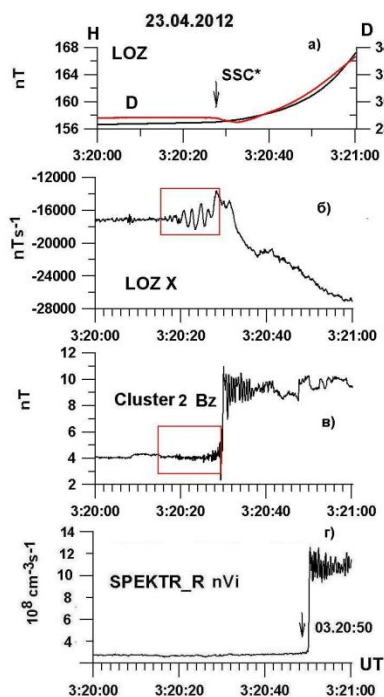


Рис.5

### 2.3.2. Исследование крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в переносе возмущений от Солнца к магнитосфере Земли.

Руководитель Ермолаев Ю.И. (ИКИ РАН)

#### 1. Исследована усредненная динамика крупномасштабных типов солнечного ветра.

Мы анализируем 4 явления (corotating interaction region CIR; interplanetary coronal mass ejection ICME, разделенных на магнитные облака MC и Ejecta и области сжатия перед ними Sheath, а также межпланетная ударная волна IS) и 8 последовательности явлений, которые могут возбуждать магнитные бури: (1) CIR, (2) межпланетная ударная волна (IS)/CIR, (3) Ejecta, (4) Sheath/Ejecta, (5) IS/Sheath/Ejecta, (9) MC, (7) Sheath/MC и (8) IS/Sheath/MC. Мы используем новую модификацию двойного метода наложенных эпох аналогичную той, которую ранее нами использовалась в работе [Yermolaev Yu.I., N.S. Nikolaeva I.G. Lodkina, M.Yu. Yermolaev, [Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch](#)

[analysis](#), Annales Geophysicae, Vol. 28, N 12, pp.2177-2186, 2010], но отличающаяся тем, что она может быть использован не только для анализа одного интервала, соответствующего одному явлению (в аналоге - главной фазы магнитной бури), а для последовательности примыкающих друг к другу разных физических явлений. Показано, что области CIR и Sheath с IS (или без IS, соответственно) близки друг другу по большинству параметров. При этом, появление IS связано в основном с более высокой скоростью в «поршне» (быстрый поток солнечного ветра или Ejecta и MC).

Подготовлена публикация для JGR: Yermolaev, Y. I., I. G. Lodkina, N. S. Nikolaeva, and M. Y. Yermolaev, Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by double superposed epoch analysis

## **2. Проанализировано возможное расстояние от точки регистрации до дочки генерации среднемасштабных возмущений солнечного ветра.**

Мы оценили возможное расстояние от точки регистрации до дочки генерации среднемасштабных возмущений солнечного ветра на примере вариаций плотности протонов и альфа-частиц, измеренных на КА WIND [Viall et al., 2009]. Полученные оценки показывают, что крупномасштабные явления солнечного ветра с характерным временным масштабом сутки и более рождаются на Солнце и содержат информацию об области образования, в то время как среднемасштабные явления с характерным временным масштабом рождаются уже в межпланетной среде и "забывают" об условиях на Солнце. Это необходимо учитывать при исследовании роли различных типов солнечного ветра в генерации магнитосферных возмущений.

Публикация: Ю. И. Ермолаев «Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра?», Геомагнетизм и Аэрономия, 2014, том 54, № 2, с. 174–175.

## **3. Моделирование скорректированного (с учетом токов магнитопаузы) Dst\* индекса на главной фазе магнитных бурь с разным типом источника в солнечном ветре**

В нашей недавней работе (Николаева Н. С., Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРЕМЕННОГО ХОДА Dst ИНДЕКСА НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ РАЗНЫМИ ТИПАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2013, том 51, № 6, с. 443-454) мы моделировали динамику Dst индекса (развитие) главной фазы магнитной бури линейной зависимостью от интегрального электрического поля ( $\sum E_y$ ), динамического давления ( $P_d$ ), и уровня флуктуаций ( $sB$ ) межпланетного магнитного поля (ММП). В этой статье мы учитывали вклад давления СВ в виде аддитивного члена  $s_r \cdot P_d$ , при этом

предполагалось, что вклад этого члена мал (т.е. влияние динамического давления СВ на  $D_{st}$  мало) и может быть аппроксимирован линейным членом. Результаты работы показали, что для CIR и Ejecta этот член нельзя считать малым, и это предположение может быть источником ошибки. Поэтому в настоящей работе мы проводим обработку временного хода скорректированного на величину давления (с учетом токов магнитопаузы)  $D_{st}^*$  индекса, аналогичную той, которую выполнили в предыдущей работе.

Было выполнено 3 вида моделирования  $D_{st}^*$ : (1) индивидуальными значениями коэффициентов аппроксимации; (2) коэффициентами аппроксимации, усредненными по типу СВ; (3) также, как в пункте 2, но с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури. Результаты моделирования скорректированного  $D_{st}^*$  индекса сравниваются с моделированием обычного  $D_{st}$  индекса. В условиях большого статистического разброса коэффициентов аппроксимации, использование  $D_{st}$  вместо  $D_{st}^*$  на точность моделирования и коэффициент корреляции влияет незначительно.

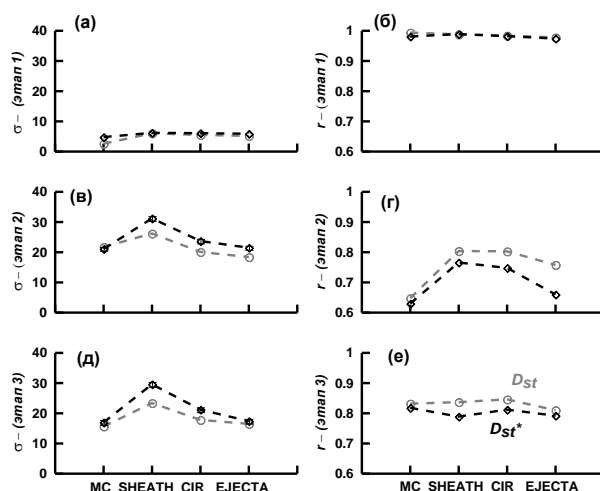


Рис.1. Среднеквадратичные отклонения ( $\sigma$ ) и коэффициенты корреляции ( $r$ ) в зависимости от типа СВ на 3-х этапах моделирования главной фазы: (а, б) индивидуальными коэффициентами (этап 1); (в, г) усредненными по типу СВ коэффициентами аппроксимаций (этап 2); (д, е) с учетом значений  $D_{st}^*$  индекса, предшествующих началу главной фазы магнитной бури) (этап 3). Ромбики и черная пунктирная линия обозначает результаты для скорректированного  $D_{st}^*$  индекса, кружки и серая пунктирная линия относятся к измеренному  $D_{st}$  индексу.

Публикации:

1. Н. С. Николаева, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Зависимость геомагнитной активности во время магнитных бурь от параметров солнечного ветра для разных типов течений. 4. Моделирование для магнитных облаков, Геомагнетизм и Аэрономия, 2014, том 54, № 2, с. 163–173

2. Н.С. Николаева, Ю.И. Ермолаев, И.Г. Лодкина, “Моделирование временного хода корректированного

Dst \* индекса на главной фазе магнитных бурь, генерированных разными типами солнечного ветра”, Космич. Исслед., 2015 - принято к печати.

#### **4. Исследована связь главной и восстановительной фаз магнитных бурь, генерированных разными межпланетными драйверами.**

На основе нашего «Каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000гг.» [Ермолаев и др., Космические исследования, 2009, 47 (2), 99-113] (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/>) мы сравнили поведение главной и восстановительной фаз магнитных бурь, генерированных различными типами солнечного ветра: область сжатия перед быстрым потоком солнечного ветра - corotating interaction region CIR; межпланетным проявлением выброса корональной массы - interplanetary coronal mass ejection ICME, разделенных на магнитные облака MC и Ejecta и области сжатия перед ними Sheath). Показано, что развитие и главной фазы, и восстановительной фазы магнитной бури зависит от типа межпланетного драйвера, и эти различия необходимо учитывать при исследованиях реакции магнитосферы на межпланетные возмущения, в том числе и при прогнозировании магнитных бурь.

Публикация: Yermolaev, Y. I., I. G. Lodkina, N. S. Nikolaeva, and M. Y. Yermolaev (2014), Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 10, 8126–8136, doi:[10.1002/2014JA019826](https://doi.org/10.1002/2014JA019826)

#### **2.3.3. Изучение физических процессов, происходящих в околоземном космическом пространстве. Солнечная генерация и модуляция космических лучей по наземным наблюдениям.**

**Руководитель Белов А.В. (ИЗМИРАН).**

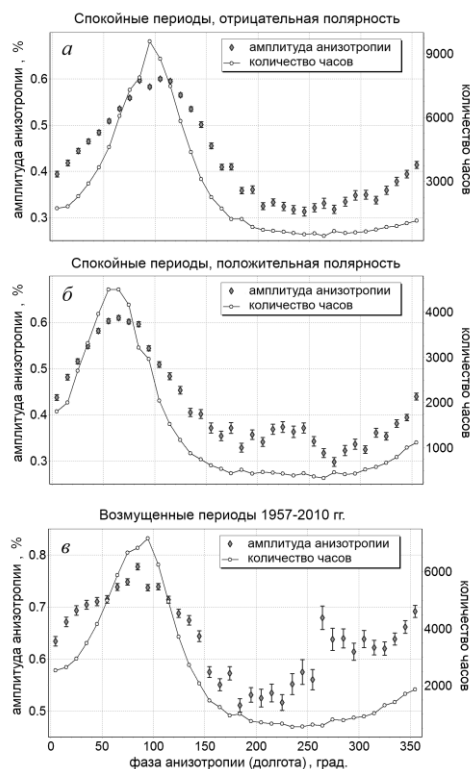
Исследование долговременных вариаций плотности и вектора анизотропии КЛ в 19-24 солнечных циклах и их связи с солнечными и межпланетными характеристиками.

Для исследования долгопериодных изменений анизотропии космических лучей использованы характеристики первой гармоники анизотропии, определенные за каждый

час методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов в период 1957-2013 гг. За каждый год этого периода получены долготные распределения векторной анизотропии космических лучей и взаимосвязь ее амплитуды и фазы. Результаты ясно демонстрируют изменения анизотропии, обусловленные магнитным солнечным циклом и циклом солнечной активности. Исследованы также распределения анизотропии при различных скоростях солнечного ветра. Выделяются и обсуждаются периоды со специфическим поведением анизотропии космических лучей. Полученные изменения анизотропии космических лучей согласуются с конвективно-диффузионной моделью анизотропии.

Полученные результаты.

- 1) Получены фазовые распределения и амплитудно-фазовые зависимости солнечно-суточной анизотропии ГКЛ за 1957-2013 гг. Эти изменения, в основных чертах, подчиняются 11- и 22-летним солнечным циклам.
- 2) Существенно неоднородное фазовое распределение и значительная амплитудно-фазовая зависимость существуют почти постоянно, но в некоторые возмущенные периоды и в отдельные периоды низкой солнечной активности при положительной полярности общего магнитного поля Солнца неоднородность значительно уменьшается.
- 3) Распределение амплитуды и фазы векторной анизотропии КЛ слабо зависит от скорости солнечного ветра.





*Рис. 1. Амплитудно-фазовая взаимозависимость солнечно-суточной анизотропии и ее фазовое распределение: а) в спокойные периоды при отрицательной полярности (1960-1969, 1982-1989, 2001-2010 годы); б) в спокойные периоды при положительной полярности (1971-1978, 1992-1999 годы); в) в возмущенные периоды 1957-2010 гг.*

Список публикаций по проекту

1. Eroshenko E., Abunin A., Abunina M., Belov A., Oleneva V., Yanke V., "Phase distribution of the first harmonic of the cosmic ray anisotropy during the initial phase of Forbush effects", 24<sup>th</sup> ECRS, Kiel, September 1-5, 2014.
2. Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г.. Изменения фазового распределения первой гармоники анизотропии космических лучей в 1957-2011 годах. Доклад на Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, Иркутск, с.15-18, 2013.

#### **2.3.4. Исследование устойчивости циклического режима солнечной активности на временной шкале до сотен миллионов лет**

**Руководитель Тясто М.И. (СПбФ ИЗМИРАН)**

Мы исследовали вариации ширины колец в образцах ископаемых деревьев, найденных в осадочных породах в области пиков юго-восточной части о-ва Александра и в районе Антарктического полуострова в Антарктике ( $\sim 70^\circ \text{S}$ ,  $70^\circ \text{W}$ ) и в Монголии (пустыня Гоби;  $43^\circ \text{N}$ ,  $108^\circ \text{E}$ ). Возраст ископаемых деревьев оценивается в 100-150 млн назад. Для выявления периодичностей в вариациях ширины радиального прироста колец был использован модифицированный метод спектрального анализа. Эти вариации с годовым разрешением содержат информацию о палеоклиматических изменениях окружающей среды в период роста окаменевших деревьев. Методом модифицированного спектрального анализа определены периодичности палеоклиматических изменений по вариациям ширины колец 13 ископаемых деревьев. Проведено сравнение полученных периодичностей с современной циклическостью солнечной активности. В частности, в спектре проявляются, наряду с другими периодами, периоды порядка 10-12, 20-22 года и около 30 лет, которые соответствуют современным солнечным циклам Швабе, Хэйла и Брюкнера. На рис 1 приведен пример результатов расчета спектральной плотности вариаций ширины колец ископаемого дерева с о-ва Александра: видно, что для данного дерева наиболее четко выделяются периодичности  $T \sim 7$ , 12 и 27 лет, а также  $T \sim 22$  года.

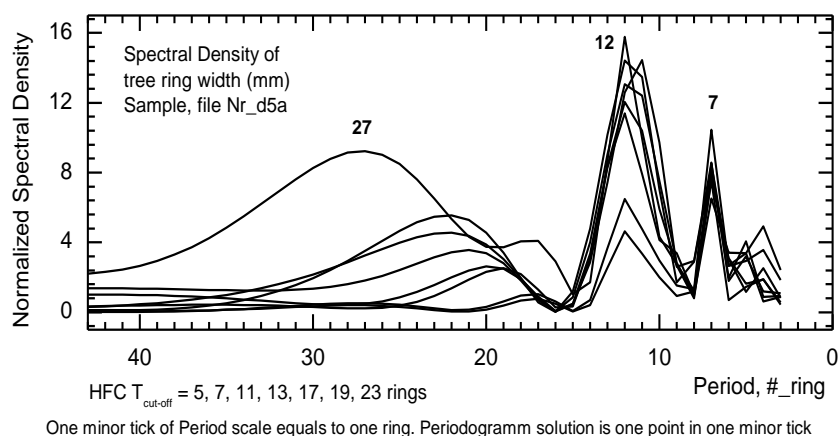


Рис. 1. Периодограмма вариаций ширины колец ископаемого дерева 4774 (Антарктический п-ов), построенная модифицированным методом спектрального анализа. Объединенные графики для отфильтрованных кривых с  $T_{cut-off} = 5, 7, 11, 13, 17, 19$  и  $23$  г.

Таким образом, анализ палеоклиматических периодичностей, полученных по данным с годовым разрешением во временном интервале 100-150 млн лет назад позволяет извлекать информацию о солнечной активности, которую в настоящее время невозможно получить при исследовании солнечной активности в далеком прошлом другими методами.

#### Публикация

1. Dergachev V.A., Raspopov O.M., Tyasto M.I., Dmitriev P.B., Ismagilov V.S., Blagoveschenskaya E.E. Study of [Solar Cyclicity Stability](#) on Time Scale of Hundreds of Millions of Years, Proceed. of the 10<sup>th</sup> Internat. Conf. "Problems of Geocosmos". Sankt-Petersburg, SpbGU, 2014.

#### 2. Анализ двух рядов данных по концентрации нитратов (ионов $\text{NO}_3^-$ ) в ледовых ядрах, извлечённых в Центральной Гренландии и Восточной Антарктиде. Установление трёхвековой (300-400 лет) цикличности в данных концентрации $^{14}\text{C}$ и $^{10}\text{Be}$

Произведён статистический анализ двух рядов данных по концентрации нитратов (ионов  $\text{NO}_3^-$ ) в двух ледовых ядрах, извлечённых в Центральной Гренландии и Восточной Антарктиде. В обоих временных рядах обнаружена отчётливая квазивековая вариация с периодом 50-150 лет на промежутке 1576-1990 гг. Показано, что данная

вариация коррелирует с циклом Глайсберга в: (а) солнечных пятнах в течение 1700-1970 гг. и (б) в концентрации космогенного  $^{10}\text{Be}$  в Центральной и Северной Гренландии в 1576-1970 гг. Таким образом, наличие вековой связи между концентрацией нитратов в полярных льдах и активностью Солнца подтверждено на временном интервале, охватывающем последние 4 века. Это указывает на то, что концентрация ионов в полярных льдах действительно может служить индикатором долговременных вариаций солнечной активности.

Произведён статистический анализ, включающий вэйвлетный и Фурье-подходы, косвенных индикаторов активности Солнца, полученных с помощью космогенных радиоуглерода и бериллия и охватывающих большую часть Голоцена. Показано, что в обоих временных рядах присутствует значимая вариация с периодом 300-400 лет. Свидетельства присутствия этой же вариации обнаружены и в данных по потку бериллия, измеренному в ледовых кернах, извлечённых на станциях Dye-3 (Южная Гренландия, AD 1424–1985) и NGRIP (Северная Greenland, AD 1389-1994). Показано, что наиболее вероятной причиной данной вариации является соответствующая цикличность в солнечной активности

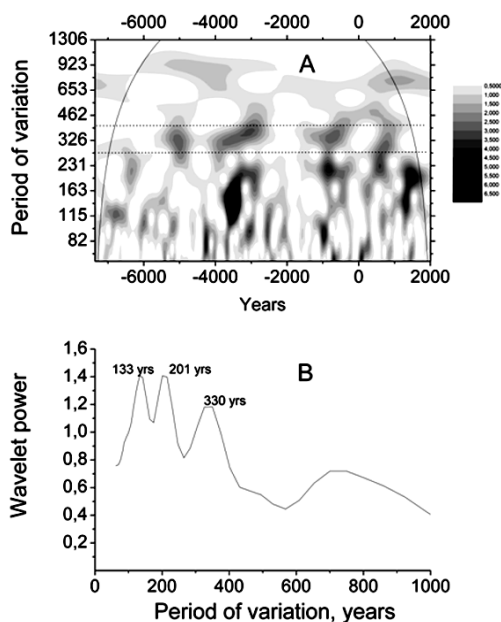


Рис. А – локальный вэйвлетный спектр полной солнечной радиации, восстановленной на основе бериллиевых данных; Б – глобальный вэйвлетный спектр той же величины.

Публикации:

1. Ogurtsov M.G., Oinonen M. 2014. Evidence of the solar Gleissberg cycle in the nitrate concentration in polar ice. J. Atm. Solar-Terr. Phys. 109, 37-42.

2. Ogurtsov M., Lindholm M., Jalkanen R. 2014. Evidence for a tri-centennial cycle in solar proxies based on cosmogenic isotopes. Month. Not. Roy. Astr. Soc. In print

### 3. Временная изменчивость эффектов солнечно-геофизических факторов в атмосферной циркуляции

Продолжено исследование временной изменчивости эффектов солнечно-геофизических факторов в атмосферной циркуляции. Исследована природа корреляционных связей, наблюдавшихся между аномалиями нижней облачности и потоками галактических космических лучей (ГКЛ) в период 1983-2000 гг. (March and Svensmark, 2000), а также возможные причины нарушения этих связей после 2000 года.

Показано, что корреляционные связи между состоянием облачности в умеренных широтах и вариациями потоков ГКЛ, наблюдаемые в масштабе 11-летнего цикла, обусловлены влиянием ГКЛ на развитие внетропических барических систем (циклонов и ложбин), формирующих поле облачности. Положительная корреляция между аномалиями нижней облачности и вариациями ГКЛ в 1983-2000 гг. являлась следствием интенсификации внетропического циклогенеза, которое наблюдается при увеличении потоков ГКЛ только в периоды сильного циркумполярного вихря. Нарушение положительной корреляции между облачностью и потоками ГКЛ после 2000 года может быть связано с изменением состояния вихря (переходом вихря в слабое состояние), которое привело к изменению характера эффектов ГКЛ в эволюции внетропических барических систем. Результаты исследования свидетельствуют о важной роли стратосферного циркумполярного вихря в механизме солнечно-атмосферных связей.



*Временной ход коэффициентов корреляции по 11-летним скользящим интервалам: кривая 1 - между аномалиями давления в умеренных широтах и потоками ГКЛ; кривая 2 - между аномалиями нижней облачности в умеренных широтах и потоками ГКЛ.*

Публикации:

1. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. “О возможных причинах нарушения корреляционных связей между состоянием облачности и потоками галактических космических лучей” // Известия РАН, серия физическая, в печати
2. Веретененко С.В., Огурцов М.Г. “Нарушение корреляции между аномалиями нижней облачности и потоками галактических космических лучей и его возможные причины” // Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика–2014”(20-25 октября 2014 года, Санкт-Петербург, ГАО РАН), в печати

### **2.3.5. Исследование воздействия космических лучей, солнечной активности и солнечного ветра на нижнюю атмосферу Земли**

**Дергачёв В.А. (ФТИ РАН)**

#### **1. Изучение солнечной цикличности по данным палеодендрохронологии**

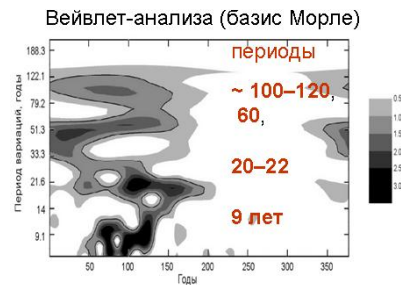
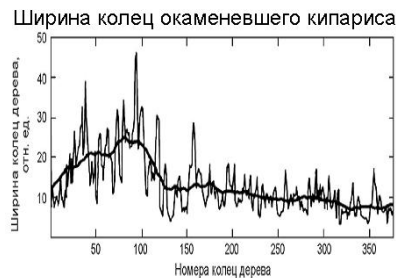
Проанализированы уникальные палеоклиматические данные (ширина колец ископаемых окаменевших деревьев) с годичным временным разрешением с целью изучения проявления периодичности климатических процессов в интервале 70–45 млн лет назад. Установлено, что в прошлом (70–45 млн. лет назад) в климатических колебаниях с наибольшей интенсивностью проявлялись квазидвухсотлетняя и квазивековая периодичности. Можно с уверенностью утверждать, что эти климатические осцилляции связаны с воздействием солнечной цикличности Зюсса–де Фриза и Глайсберга на климатические процессы, поскольку климатический отклик на это солнечное воздействие проявляется вне зависимости от конфигурации континентов и, следовательно, от проявления внутренних процессов в системе атмосфера–океан. В спектрах проанализированных палеоклиматических данных проявляются цикличности, характерные для СА и в настоящее время, – это квазидвадцатилетняя и 11-летняя периодичности. В палеоклиматическом спектре 45 млн. лет назад четко прослеживаются и периодичности в 5, 7 и 9 лет. Периодичность в 9 лет выявлена и в ископаемой древесине возрастом 68–70 млн. лет. Аналогичные периодичности прослеживаются в полярных регионах и в настоящее время. Исследования свидетельствуют, что эти периодичности связаны с внутренними процессами в системе атмосфера–океан.

*Выводы.* Анализ климатических периодичностей с помощью палеодендрохронологии дает информацию о солнечной цикличности, недоступную при исследованиях другими методами. Выявленные палеопериодичности близки по значениям современным периодичностям солнечной активности.

Части ствола окаменевшего кипариса, поднятого из угольной шахты (Канада)



Образец среза хвойного дерева из музея заповедника «The Petrified Forest» (США)



Публикация.

O. M. Raspopov, V. A. Dergachev P. B. Dmitriev and O. V. Kozyreva. Manifestation of Variations in Solar Activity 70–45 Ma Ago. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, Vol. 50, No. 7, pp. 678–695.

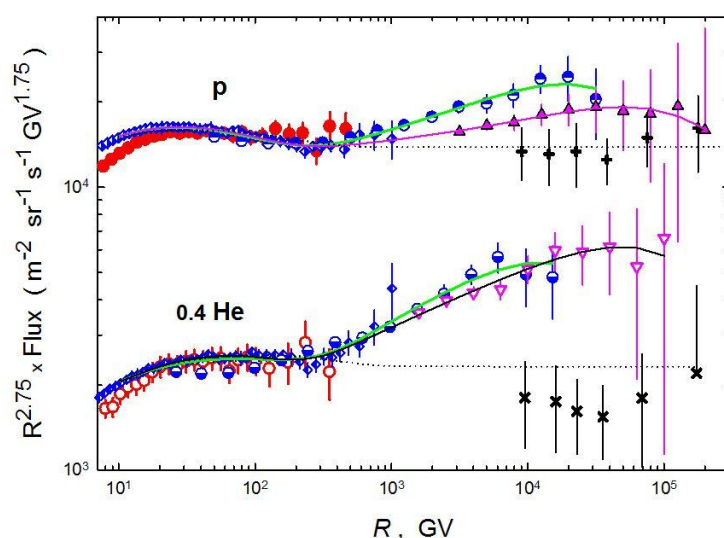
## Проект 2.4. Гелиосфера

### 2.4.1. Исследование ускорения заряженных частиц при взаимодействии электромагнитных волн с плазмой на границе гелиосферы.

Руководитель Ерохин Н.С. (ИКИ РАН)

В работе на основе анализа экспериментальных данных и численного моделирования предложено объяснение переменности спектров космических лучей (КЛ) протонов (p) и ядер гелия (He) в диапазоне энергий  $\sim (30 \div 2 \cdot 10^5)$  ГВ, причем акцент сделан на переменности потоков p и He в области энергий  $> 1$  ТэВ.

Спектрометр заряженных частиц, измеренный прибором PAMELA, установленным на спутнике Ресурс-ДК1, работающим в широком диапазоне энергий  $\sim (1 \div 1000)$  ГэВ, обнаружил особенность (резкий V-образный излом) в спектрах p и He (измеренных в течение 2006 – 2008 гг.) в окрестности жесткостей  $\sim 230$  ГВ, как видно на рис.1.



**Рис.1.** Спектры  $p$  и  $He$  (и их аппроксимации) для 5-и экспериментов: *PAMELA* (полузаполненные ромбики) и *BESS-TeV* (кружочки) в диапазоне  $< 1$  ТэВ, а также *ATIC-2* (полузаполненные кружки), *CREAM* (треугольники) и *RUNJOB* (крестики) в диапазоне  $> 1$  ТэВ. По оси абсцисс – жёсткость  $R$ , по оси ординат – поток умноженный на жёсткость в степени 2.75 ( $Flux \cdot R^{2.75}$ ).

Наличие излома в спектрах жёсткости  $p$  и  $He$  (в области около 230 ГВ) зависит от соотношения между амплитудами и степенными индексами фона: “мягкого” гелиосферного источника («серфотронный механизм») и “жёсткого” близкого Галактического источника.

#### Публикации

1. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А. О причине излома в спектрах жёсткости космических лучей протонов и ядер гелия около  $\sim 230$  ГВ. Принята к публикации в журнале “Физика плазмы” (Plasma Physics Reports), ноябрь 2014 г.
2. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Зольникова Н. Н., Михайловская Л.А. О причине излома в спектрах космических лучей протонов и ядер гелия около  $\sim 230$  ГВ. I Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Тезисы докладов. Секция “Физика плазмы и взаимодействие электромагнитного излучения с веществом”. Москва, РУДН, 2014, с.137-140.
3. Лозников В.М., Ерохин Н.С., Михайловская Л.А., Зольникова Н.Н. О причине излома в спектрах космических лучей протонов и гелия около  $\sim 230$  ГэВ. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов. Москва, МИФИ, 2014, т.1, с.73.
4. Ерохин А.Н., Зольникова Н.Н., Ерохин Н.С. Оптимальные условия захвата и серфотронного ускорения релятивистских электронов электромагнитной волной в космической

плазме. L Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Секция "Физика плазмы и взаимодействие электромагнитного излучения с веществом", Москва, РУДН, 2014, с.146-150.

5. Ерохин Н.С., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А., Лозников В.М. Ультрарелятивистское ускорение протонов электромагнитной волной в космической плазме. L Всероссийская конференция по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники. Тезисы докладов. Секция "Физика плазмы и взаимодействие электромагнитного излучения с веществом", Москва, РУДН, 2014, с.154-157.

**2.4.2.. Газодинамические модели физических явлений, встречающихся в солнечной системе. Проект направлен на решение фундаментальной проблемы взаимодействия Солнца и межпланетной среды с окружающей их межзвездной средой и телами солнечной системы.**

**Баранов В.Б. (ИПМех РАН)**

Разработана численная модель дрейфового ускорения межзвездных захваченных протонов на гелиосферной ударной волне в трехмерной геометрии. Тепловые и энергичные протоны, а также межзвездные атомы водорода учитываются самосогласованным образом. Взаимодействие между протонами и атомами осуществляется через перезарядку. В модели учитываются многократные отражения протонов от фронта ударной волны и рассеяние частиц по питч-углам в окрестности фронта. Существенным фактором, влияющим на энергетические спектры ускоренных частиц, является вариация направления магнитного поля в окрестности ударного фронта, связанная с прохождением секторной структуры поля через фронт. Полученные результаты позволяют объяснить измерения энергичных протонов на КА Вояджер 1/2 при пересечении ими гелиосферной ударной волны.

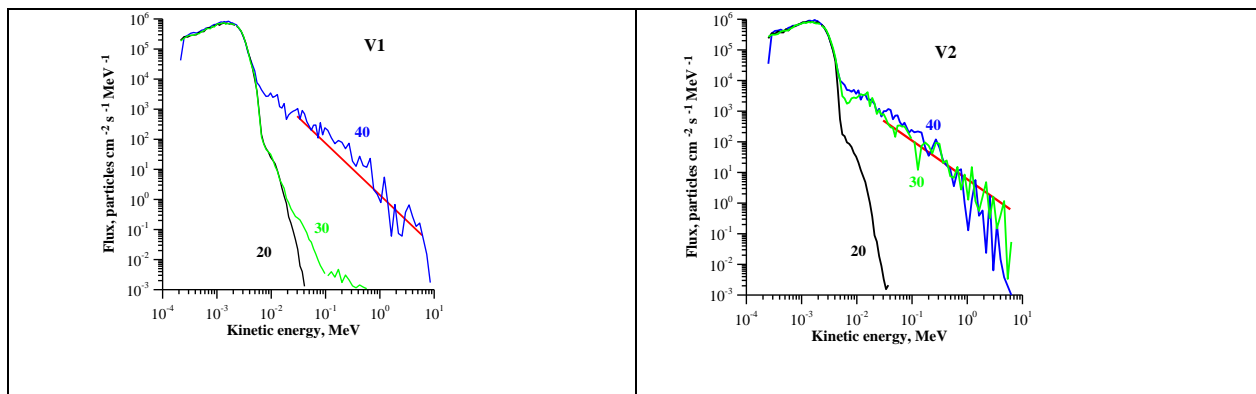




Рис.1. На рисунках показаны дифференциальные потоки захваченных протонов за фронтом гелиосферной ударной волны, рассчитанные в рамках данной модели. Потоки соответствуют реальным положениям КА Вояджер-1 (V1) и Вояджер-2 (V2). Красные линии – измерения. Черные, зеленые и синие соответствуют различным углам «раствора» гелиосферного токового слоя по гелиошироте – 20, 30 и 40 градусов. Именно в этих областях и существуют крупномасштабные вариации направления магнитного поля. Гелиошироты у V1 и V2 при пересечении гелиосферной ударной волны были разные. Именно с этим и связаны различия в теоретических кривых для V1 и V2. При угле «раствора» токового слоя в 20 градусов ни V1, ни V2 не попадали в область благоприятных условий для дрейфового ускорения. При угле в 30 градусов V1 не попал, а V2 находился внутри этой области.

Проведен анализ возможного влияния токов Холла на структуру гелиосферного интерфейса. Показано, что теплопроводность может играть существенную роль во внешнем гелиошисе (внешнем ударном слое). Предложена альтернативная интерпретация измерений на аппарате Вояджер-1, связанная с возможным выходом аппарата в межзвездную среду.

Численным методом с выделением поверхностей сильного разрыва решена трехмерная задача об обтекании кометных атмосфер солнечным ветром. На примерах хорошего совпадения результатов расчета с экспериментальными данными, полученными на аппарате Джотто при исследовании кометы Галлея и Грига – Шеллерупа в 1986 году, даются предсказания экспериментальных данных, которые могут быть получены в ноябре 2015 года при помощи аппарата Розетта.

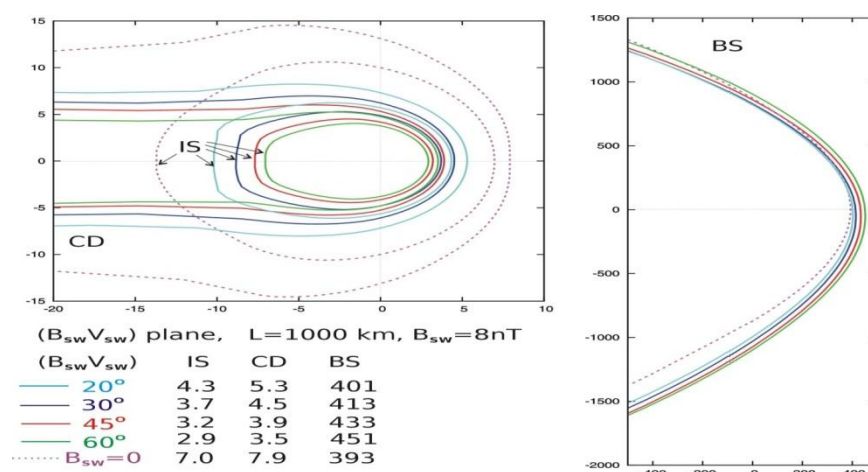


Рис.2. На Рисунке показано влияние межпланетного магнитного поля на положение и форму головной ударной волны (BS), на ударную волну в коме кометы (IS) и на тангенциальный разрыв (CD) при разных углах между векторами межпланетного

*магнитного поля и скорости солнечного ветра. Приведены также расстояния до этих поверхностей сильного разрыва вдоль направления комета – Солнце в условиях, близких к условиям вблизи кометы Галлея в марте 1986 года.*

Публикации

1. Алексашов Д.Б., Баранов В.Б., Лебедев М.Г., Трехмерная магнитогидродинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с кометными атмосферами, Известия РАН, МЖГ, № 1, 2015.
2. Баранов В.Б., Лебедев М.Г., Распределение плотности протонов солнечного ветра и «нагруженных» ионов в ударном слое перед ионосферой кометы, Письма в АЖ, т. 40, №10, с. 714 – 722, 2014.
3. Baranov V.B., On possible effect of Hall currents and anisotropy of the thermal conductivity on the plasma flow in the heliospheric interface, 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract D1.1-18-14.
4. Baranov V.B., Alexashov D.B., Lebedev M.G., A new MHD model of the solar wind/cometary ionosphere interaction, 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract B0.4-42-14.
5. Chalov S.V., Propagation of acoustic waves in the partly ionized interstellar medium, Month. Not. Roy. Astron. Soc., 441, 2452–2455, 2014.
6. Chalov S., Malama Y., Alexashov D., Izmodenov V., Shock-drift acceleration of interstellar pickup protons at the solar wind termination shock: Self-consistent 3D kinetic-gasdynamic model, 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, Abstract D1.1-17-14.

**2.4.3. Исследование физических процессов на границе гелиосферы - области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой - посредством теоретического анализа взаимодополняющих экспериментальных данных**

**Руководитель Измоденов В.В. (ИКИ РАН)**

**1. Моделирование спектров поглощения Лайман-альфа излучения в направлении ближайших звезд, сравнение с данными Hubble Space Telescope (HST).**

Анализ спектров поглощения в линии Лайман-альфа в направлении ближайших звезд (а именно, красной части спектра, которая отвечает за поглощения в области гелиосферного ударного слоя) является одним из косвенных способов удаленной диагностики структуры границы гелиосферы. Предыдущий анализ спектров поглощения, полученных на HST в хвостовой части гелиосферы, показал, что поглощение может

осуществляться на расстояниях до 3000 а.е. от Солнца. Это означает, что численные модели, используемые для анализа данных, должны иметь удлиненную расчетную область в хвостовой части гелиосферы.

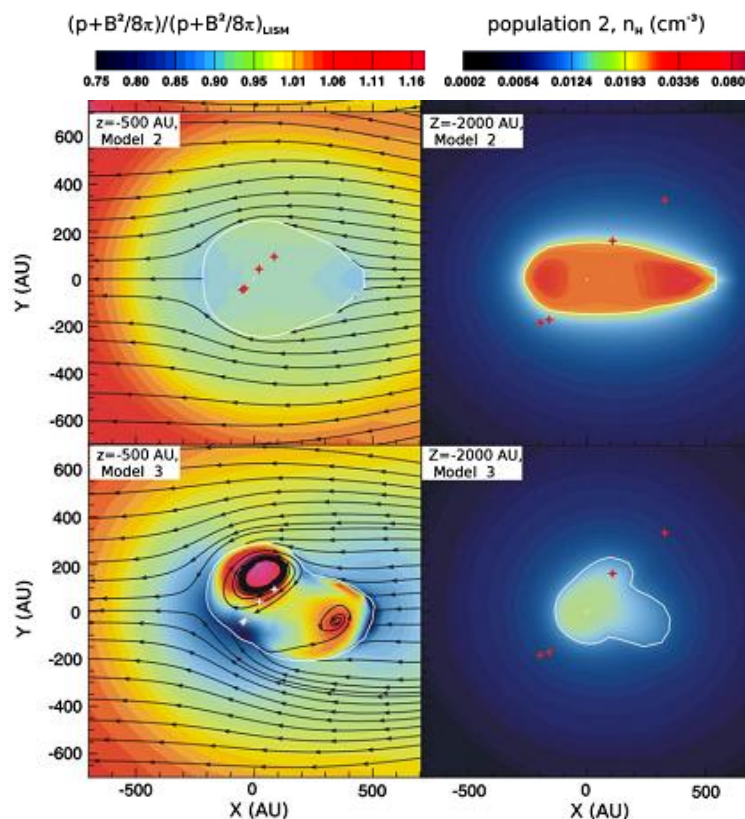


Рис.1. Распределение полного давления плазмы (слева) и концентрации рассеивающих атомов (справа) на расстоянии 500 а.е. в хвостовой части гелиосферы. Снизу показаны результаты наиболее полной модели (3) с учетом магнитных полей и неоднородности солнечного ветра, а сверху показаны результаты упрощенной модели (2) со сферически-симметричным солнечным ветром.

В данной работе впервые для анализа спектров поглощения использовалась трехмерная кинетико-МГД модель взаимодействия солнечного ветра с Локальной межзвездной средой (ЛМС), в которой расчетная область в хвостовой части расширена до 6000 а.е. Модель учитывает как межзвездное, так и гелиосферное магнитные поля. Также в данной модели учитывалась зависимость параметров солнечного ветра от широты на орбите Земли. А именно, задавалась зависимость характерная для солнечного минимума, когда имеются высокоскоростные потоки солнечного ветра на полюсах и низкоскоростной поток вблизи экватора. Эти эффекты приводят к существенно неоднородной и асимметричной структуре течения плазмы в хвостовой части гелиосферы. На рис. 1 показано распределение полного давления плазмы и

концентрации атомов водорода на расстоянии 500 а.е. в “хвосте” гелиосферы. Для сравнения приведены результаты основной модели (нижние графики, модель 3) и аналогичной модели без учета неоднородности солнечного ветра (модель 2). Видно, что учет неоднородности приводит к образованию двух асимметричных максимумов давления в хвостовой части, которые отсутствуют в случае более простой модели. Как будет показано ниже, такая сложная структура течения плазмы проявляется в спектрах поглощения.

На основании распределения атомов водорода в области гелиосферного ударного слоя, полученного в рамках трех различных моделей, были рассчитаны спектры поглощения Лайман-альфа излучения в направлении четырех звезд (две в носовой части гелиосферы и две в хвостовой части). Сравнение полученных спектров с данными HST показано на рис. 2. Видно, что различная степень асимметрии течения, заложенная в моделях, оказывает влияние на спектры поглощения. В целом совпадение результатов всех трех моделей с данными HST является достаточно хорошим, хотя все модели предсказывают больший коэффициент непрозрачности спектра, чем это наблюдается в экспериментальных данных. Одной из возможных причин такого различия является предположение об однокомпонентном характере распределения плазмы в моделях. В дальнейшем планируется расширить данное исследование на случай моделей с учетом надтепловой компоненты плазмы (так называемых, захваченных протонов.)

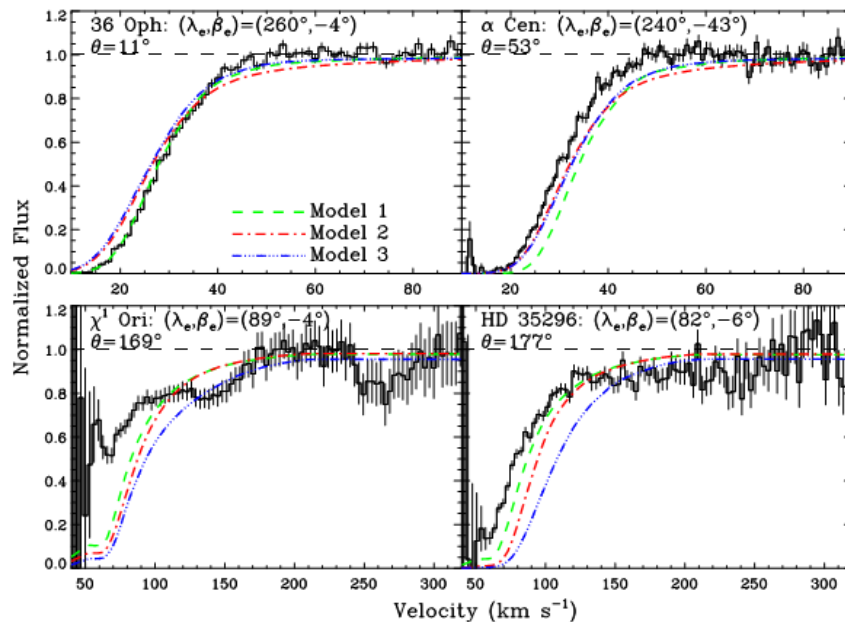


Рис.2 Спектры поглощения Лайман-альфа излучения для 4 звезд. Сравнение данных HST с результатами трех численных моделей, отличающихся конфигурацией межзвездного

магнитного поля, а также широтной зависимостью параметров солнечного ветра на 1 а.е..

## 2. Исследование влияния цикла солнечной активности на среднее направление движения межзвездных атомов водорода в гелиосфере.

Ранее в работах Lallement et al. (2005, 2010) было показано, что среднее направление движения межзвездных атомов водорода в гелиосфере (определенное из анализа данных SOHO/SWAN по рассеянному солнечному Лайман-альфа излучению) отклонено на несколько градусов по сравнению с их направлением движения в ЛМС. Это отклонение объяснялось влиянием межзвездного магнитного поля, которое приводит к асимметрии течения плазмы в районе границы гелиосферы, которое в свою очередь через процесс перезарядки сказывается на распределении атомов водорода.

В данной работе мы исследовали вопрос о том, как локальные эффекты, связанные с динамикой атомов водорода вблизи Солнца (цикл солнечной активности, положение наблюдателя на орбите Земли, немаквелловские свойства распределения атомов) влияют на среднее направление движения атомов, определенное из измерений спектров рассеянного Лайман-альфа излучения. На основании современной 3D нестационарной кинетической модели распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере было проведено численное моделирование и определено среднее направление движения атомов в гелиосфере в различные фазы солнечного цикла, для различных положений наблюдателя, а также для моделей с учетом и без учета немаквелловского характера функции распределения атомов по скоростям.

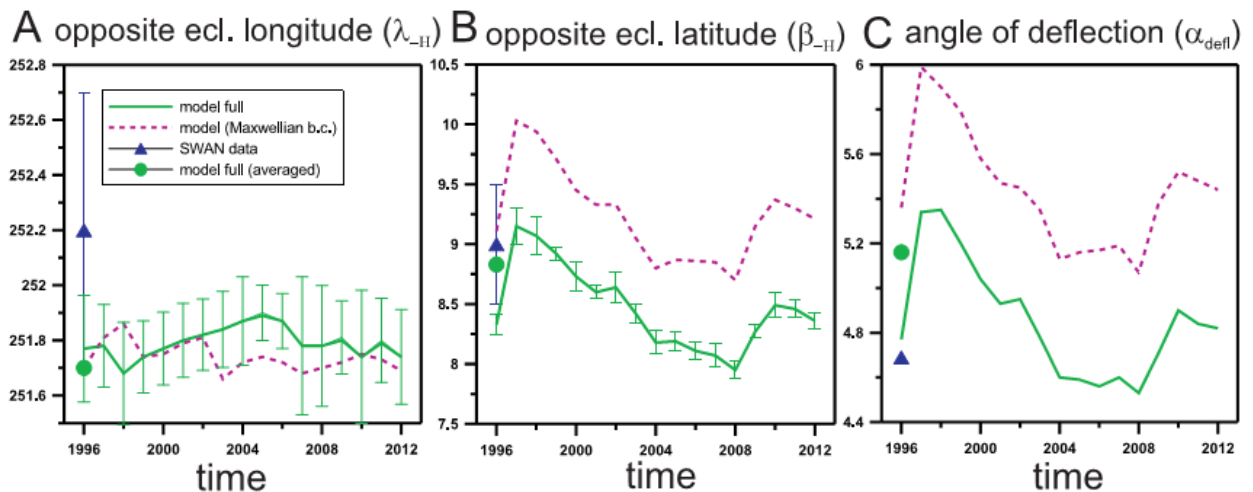


Рис.3. Эклиптическая долгота (A), широта (B) и угол отклонения (C) атомов водорода в гелиосфере в зависимости от времени, определенные из спектров Лайман-альфа излучения на 1 а.е. Зеленые кривые соответствуют результатам наиболее полной

*численной модели, малиновые кривые – результатам упрощенной модели без учета немаксвелловских свойств распределения атомов на границе гелиосферы. Синий треугольник показывает одну экспериментальную точку из данных SWAN. Зеленый круг показывает соответствующие результаты полной модели, в которой осреднение было проведено так же как и в данных измерений.*

На рис. 3. Показаны среднее направление движения атомов (эклип. долгота и широта), а также угол отклонения от первоначального направления в зависимости от времени с 1996 по 2012 г. Видно, что долгота остается примерно постоянной, в то время как широта меняется примерно на 1.2 градуса в течение цикла солнечной активности. Эти изменения вызваны изменениями силы радиационного давления, действующей на атомы вблизи Солнца. Кроме того, из сравнения зеленых и малиновых кривых на рис. 3 видно, что модель без учета немаксвелловских свойств в распределении атомов водорода (малиновые кривые) приводит к завышенной широте на 1.1 градус. Если учесть, что угол отклонения составляет порядка 4-5 градусов, то любые эффекты, приводящие к изменению угла больше чем на 1 градус, являются значительными для интерпретации наблюдаемого по Лайман-альфа излучению угла отклонения. Из сравнения теоретических результатов и экспериментальных данных SOHO/SWAN для 1996 г. (см. треугольник и круг на рис. 3) видно, что в пределах ошибки модель хорошо согласуется с данными измерений. Также были проведены расчеты угла отклонения для различных положений наблюдателя на орбите Земли. Оказалось, что эклиптическая долгота наблюдателя также значительно влияет на измеряемый угол отклонения (в течение одного оборота наблюдателя вокруг Солнца угол отклонения атомов изменяется примерно на 2 градуса).

Таким образом, в данной работе показано, что локальные эффекты (не связанные с влиянием межзвездного магнитного поля) значительно влияют на угол отклонения межзвездных атомов водорода в гелиосфере, и, следовательно, эти локальные эффекты необходимо учитывать при интерпретации экспериментальных данных (в частности, использовать для анализа данных нестационарные модели, а также делать коррекцию результатов с учетом положения наблюдателя).

### **3. Определение скорости Локальной межзвездной среды относительно Солнца на основании измерений спектра рассеянного Лайман-альфа излучения в гелиосфере.**

Измерение рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения на протяжении многих лет является одним из основных косвенных способов диагностики параметров межзвездных атомов водорода в гелиосфере. Спектр рассеянного излучения в данном

направлении позволяет определить проекцию средней скорости атомов (проинтегрированной вдоль луча зрения) на это направление. Таким образом, если знать скорость атомов вдоль направления навстречу набегающему потоку ЛМС (“upwind”), то можно определить скорость межзвездного ветра относительно Солнца.

В данной работе были проанализированы данные Hubble Space Telescope (HST) по спектрам рассеянного Лайман-альфа излучения, полученные вблизи направления “upwind” в 2012-2013 гг. Было получено значение первого момента спектра излучения, которое соответствует средней скорости атомов вдоль луча зрения. Также было проведено моделирование первого момента спектра в рамках трехмерной нестационарной кинетической модели распределения атомов водорода в гелиосфере в течение 17 лет (с 1996 по 2013 гг.). Моделирование проводилось для двух типов моделей – с учетом и без учета межзвездного магнитного поля, а также для двух значений скорости межзвездного ветра (26.4 км/с – “Ulysses model” и 23.2 км/с – “IBEX model”).

На рис. 4 показано сравнение экспериментальных данных (SOHO/SWAN и HST) с результатами численного моделирования. Нижняя кривая для двух значений скорости соответствует модели без учета межзвездного магнитного поля, а верхняя кривая – модели с учетом магнитного поля 4.4 мкГс. Видно, что в целом модели со скоростью 26.4 км/с дают намного лучшее совпадение с данными, чем модели со скоростью 23.2 км/с.

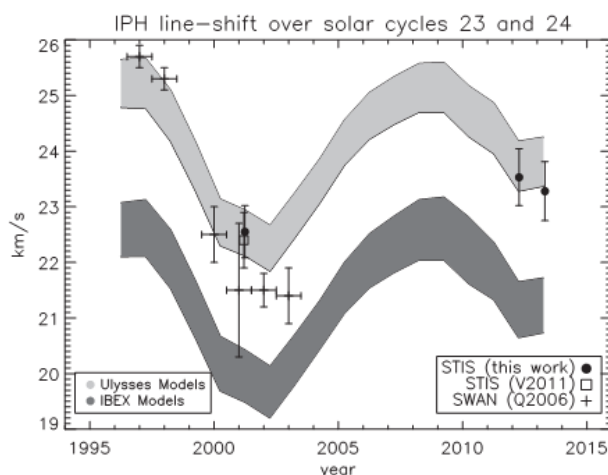


Рис. 4. Первый момент спектра рассеянного Лайман-альфа излучения в направлении «upwind» как функция времени. Показаны результаты 4 моделей (верхняя и нижняя граница двух закрашенных областей) с учетом и без учета межзвездного магнитного поля, а также с различной скоростью ЛМС относительно Солнца. Символами показаны результаты экспериментальных данных SOHO/SWAN и HST.



Таким образом, проведенное исследование показало, что скорость ЛМС 23.2 км/с, которая была ранее определена из анализа данных IBEX по потокам межзвездных атомов гелия, противоречит данным HST по рассеянному Лайман-альфа излучению. Также исследовано влияние межзвездного магнитного поля на среднюю скорость атомов в гелиосфере. Показано, что учет магнитного поля приводит к увеличению модуля средней скорости примерно на 1 км/с, и это значение не зависит от фазы солнечного цикла. Такое увеличение связано с тем, что в случае межзвездного магнитного поля головная ударная волна в ЛМС отсутствует, и, следовательно, плазма ЛМС менее тормозится в области внешнего ударного слоя. Т.е. рожденные из протонов ЛМС вторичные межзвездные атомы также имеют большую скорость по сравнению со случаем без магнитного поля, когда присутствует головная ударная волна, на которой плазма эффективно тормозится.

#### **4. Перекрестный анализ данных SOHO/SWAN и MESSENGER/UVVS по интенсивности рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения.**

В данной работе проведен совместный анализ данных по интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения, полученных одновременно (в 2010-2011 гг.) с помощью прибором SWAN и UVVS (на аппаратах SOHO и MESSENGER, соответственно). Использование данных с двух аппаратов впервые позволило исследовать распределение атомов водорода внутри орбиты Земли (т.е. на расстояниях меньше 1 а.е. от Солнца). Сравнение с результатами численного моделирования показало, что это распределение существенно зависит как от локальных эффектов, связанных с Солнцем (сила радиационного отталкивания, а также ионизация), так и от вектора скорости ЛМС относительно Солнца. Показано, что результаты численного моделирования хорошо воспроизводят данные измерений. Это означает, что информация о солнечной активности, заложенная в модели, является достаточно точной.

#### **Публикации**

1. Wood B.E., Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Redfield S., Edelman E., A new detection of Ly $\alpha$  absorption from the heliotail, *Astrophys. J.*, V. 780:108, 12 pp, 2014.
2. Katushkina O.A., Izmodenov V.V., Alexashov D.B., Direction of the interstellar hydrogen flow in the heliosphere: theoretical modelling and comparison with the SOHO/SWAN data, *MNRAS*, 2014, in press.
3. Frederic E. Vincent, Olga Katushkina, LotBen-Jaffel, Walter M. Harris, Vladislav Izmodenov, Eric Quemerais, Dimitra Koutroumpa, John Clarke, Observations of the



interplanetary hydrogen during solar cycles 23 and 24. What can we deduce on the local interstellar medium? *Astrophys. J. Let.*, V. 788, Is. 2, article id. L25, 6 pp., 2014.

4. E.Quemerais, B. McClintock, G. Holsclaw, O. Katushkina, V. Izmodenov, Hydrogen Atoms in the Inner Heliosphere: SWAN-SOHO and MASCS-MESSENGER Observations, *J. of Geophys., Res.*, 2014, DOI: 10.1002/2014JA019761.

## **Проекты СО РАН**

### **Волновой аспект солнечно-магнитосферного взаимодействия**

**А.С. Потапов (ИСЗФ СО РАН)**

Представлены результаты исследования циклических вариаций релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и поиска их связи со скоростью солнечного ветра и волновой активностью. Выполнен кросскорреляционный анализ связи между суточными значениями интенсивности наземных и межпланетных ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний в диапазоне Pc5 и параметрами солнечного ветра за период 23-го цикла солнечной активности 1996–2006 годов. Методом наложенных эпох исследованы особенности режима и магнитосферного отклика ультранизкочастотной активности, сопровождающей два основных типа высокоскоростных потоков солнечного ветра. Изучен отклик электронов внешнего радиационного пояса на разные типы потоков.

Выполнено сравнение связи потоков электронов с параметрами солнечного ветра, индексами геомагнитной активности и геомагнитными пульсациями. Показано, что возможность использования среднеширотных пульсаций P1B для индикации появления популяции суббуревых электронов в магнитосфере зависит от таких факторов, как уровень геомагнитной возмущенности и долгота локализации начала суббури.

Решена задача о переносе момента движения из солнечного ветра в геомагнитный хвост потоком магнитозвуковых волн. Поставлена и решена задача о пространственной структуре возбуждаемых солнечным ветром МГД-волн в аксиально-симметричной модели геомагнитного хвоста с токовым слоем. Показано, что неоднородность геомагнитного поля и плазмы во внешней приэкваториальной части магнитосферы формирует волновод для БМЗ-волн, протянувшийся от лобовой области до далеких флангов магнитосферы, как в утреннем, так и в вечернем секторах. Аналитически и численно исследована эволюция колебаний в волноводе при их распространении от

лобовой области до дальнего хвоста. Определен спектральный состав колебаний и их пространственная структура.

Исследованы характеристики межпланетной среды на орбите Земли и геомагнитной активности в минимуме 23-го цикла солнечной активности по сравнению с минимумами других солнечных циклов. Показано, что минимум 23-го цикла отличается от других рассматриваемых минимумов значительным уменьшением плотности и скорости солнечного ветра и напряженности межпланетного магнитного поля.

Публикации 2014г.

Potapov A.S., B. Tsegmed, L.V. Ryzhakova. Solar cycle variation of “killer” electrons at geosynchronous orbit and electron flux correlation with the solar wind parameters and ULF waves intensity // Acta Astronautica, V. 93(1), 2014, 55–63. Doi:[10.1016/j.actaastro.2013.07.004](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.004).

Дегтярев В.И., Попов Г.В., Чудненко С.Э. Геомагнитная возмущенность в периоды минимумов солнечной активности // Вопросы естествознания, Иркутск, ИрГУПС, 2014. Вып. 3(4).

Дегтярев В.И., Попов Г.В., Чудненко С.Э. Солнечный ветер в минимумах солнечной и геомагнитной активности за прошедшие 35 лет // Вопросы естествознания, Иркутск, ИрГУПС, 2014. Вып. 3(4).

Potapov A.S., Tsegmed B., Ryzhakova L.V. ULF waves in the corotating interacting regions of the solar cycle 23 minimum. 10th International Conference “Problems of Geocosmos”. Book of Abstracts. St. Petersburg, Petrodvorets, October 6–10, 2014. St. Petersburg, 2014. P. 185–186.

Alexander S Potapov. Response of the magnetospheric ULF activity and relativistic electrons to high speed streams of the solar wind. AGU Chapman Conference, Jeju Island, Republic of Korea, 31 August – 05 September, 2014. Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Conference Program. 2014. P. 34.

Anatol V Guglielmi, Alexander S Potapov. Sporadic and permanent oscillations in the magnetosphere: are they connected? AGU Chapman Conference, Jeju Island, Republic of Korea, 31 August – 05 September, 2014. Low-Frequency Waves in Space Plasmas. Conference Program. 2014. P. 34.

Potapov A., Ryzhakova L., Tsegmed B. ULF activity in CIR streams and its effect on the magnetosphere. 40th COSPAR Scientific Assembly 2014, Moscow, 2–10 August 2014. Program and Abstracts. 2014.

A.V. Guglielmi, A.S. Potapov. On Permanent and Sporadic Oscillations of the Magnetosphere // arXiv:1408.2916 [physics.space-ph], 2014.

## Динамические процессы в плазме Солнца, солнечном ветре и магнитосферах планет

**В.М. Григорьев, А.С. Леонович (ИСЗФ СО РАН)**

По данным космической обсерватории SDO изучено образование полутени солнечного пятна. Впервые прослежено образование отдельного спайна. Спайн образуется в результате подъёма на поверхность трубки магнитного поля, ориентированной приблизительно радиально от центра пятна. По результатам анализа данных инструмента AIA/SDO и EUVI/STRERO показано, что начальная фаза “постепенного” коронального выброса массы (КВМ) начинается как движение из состояния покоя внешней оболочки коронального магнитного жгута, которая становится затем основой фронтальной структуры КВМ. Проанализированы синоптические карты магнитного поля Солнца и потока его УФ излучения в циклах активности 21 – 24. Изучены особенности процесса смены знака магнитных полей на полюсах Солнца.

В рамках изучения волновых процессов в магнитосферно-ионосферной системе проанализированы непрерывные магнитные наблюдения излучения ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) на среднеширотной обсерватории Монды, проводившиеся с помощью индукционного магнитометра LEMI-30 в период с марта 2010 г. по май 2011 г. Исследована морфология излучения ИАР, рассмотрены его связи с другими явлениями и ионосферными параметрами. Разработан новый метод обработки сигналов для изучения вклада стоячих МГД волн в возмущение геомагнитного поля в высокочастотной части диапазона КПК (от 0.5 до 1 Гц). Метод, основанный на анализе корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы сигнала, позволяет измерять период первой гармоники  $T_1$  одномерной стоячей волны, по любому временному участку записи колебаний. На основе метода инверсии магнитограмм (ТИМ), разработанного в ИСЗФ СО РАН, исследован процесс переноса в магнитосферу энергии в течение суббури 27.08.2001. Решена задача о структуре сцепленных азимутально-мелкомасштабных альфвеновских и медленных магнитозвуковых (ММЗ) волн в аксиально-симметричной модели геомагнитного хвоста с токовым слоем.

### Публикации

1. Григорьев В.М., Л.В. Ермакова, А.И. Хлыстова // Формирование ведущего пятна в активной области по данным SDO // Изв. Крымской Астрофиз. Obs. 109, № 2, 64, 2013.

2. Ермакова Л.В. // Магнитные поля активных областей // Физика Солнца и околоземного космического пространства. Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения В.Е.Степанова. Иркутск, с. 60-65, 2013.
3. Мордвинов А.В., Язев С.А. Распад комплексов активности и формирование корональных дыр на Солнце // Астрон. журнал, Т. 90. №6, с. 491–500, 2013.
4. Мордвинов А.В., Язев С.А. Инверсия магнитного поля на полюсах Солнца и формирование корональных дыр // Физика Солнца и околоземного космического пространства. Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения В.Е.Степанова. Иркутск, с. 99–103, 2013.
5. Еселевич В.Г., Еселевич М.В. Отличия в развитии начальной фазы формирования двух типов корональных выбросов массы. Космические исследования, Т. 53, N1, с. 1-11, 2015.
6. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions. J. Atmosph. Solar Terr. Phys., 119, 91–101, 2014. DOI:10.1016/j.jastp.2014.07.001.
7. 2. Potapov A. S., Polyushkina T. N., Dovbnya B. V., Tsegmed B., Rakhmatulin R. A., Podlesnyi A. V. Frequency structure of IAR spectral bands and parameters of middle and upper ionosphere // XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium (XXXI URSI GASS), Beijing, China, August 17–23 2014. GP2.5.
8. Клибанова Ю.Ю., В.В. Мишин, Б. Цэгмэд. Особенности дневных длиннопериодных пульсаций, наблюдаемых во время импульса солнечного ветра на фоне суббури 1 августа 1998 года. Космические исследования, 2014, том 52, №5.
9. Mishin V.V., V.M. Mishin, Z. Pu, S.B. Lunyushkin, L.A. Sapronova, U. Sukhbaatar and D.G. Baishev. Old tail lobes effect on the solar-wind - magnetosphere energy transport for the 27 August 2001 substorm. J. Adv. Space. Res. 2014, принято в печать.
10. Поляков А.Р. Анализ структуры стоячих МГД волн в магнитосфере методом корреляционных функций флуктуаций амплитуды и фазы// Геомагнетизм и аэрономия. 2014. т. 54. № 6. 1-12.
11. Polyakov A.R. The structure of one-dimensional standing MHD waves in, and at the boundary of, the dayside plasmasphere.// J. of Atmosph. and Solar-Terrestrial Phys. 119(2014), 193–202.

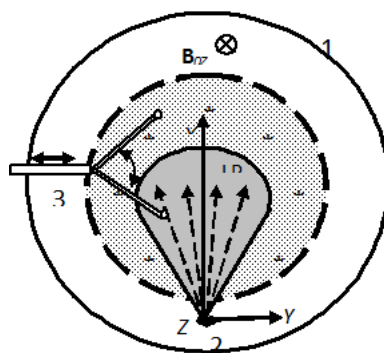
12. Dmitrienko I. S., Evolution of FMS and Alfvén waves produced by the initial disturbance in the FMS waveguide, J. Plasma Physics, **79**, p.7-17; doi: 10.1017/S0022377812000608, 2013.
13. Leonovich, A.S. and Kozlov D.A. Coupled guided modes in the magnetotails: spatial structure and ballooning instability, Astrophysics and Space Science, 353, 9-23, 2014.
14. Saka O., K. Hayashi, D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager, Modulation of auroras by Pc5 pulsations in the dawn sector in association with reappearance of energetic particles at geosynchronous orbit, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 110–111, Pages 1–8, doi: 10.1016/j.jastp.2014.01.010, 2014.
15. Klimushkin D.Yu., P.N. Mager, The Alfvén wave parallel electric field in non-uniform space plasmas, Astrophysics and Space Science, V. 350, Issue 2, pp 579-583, DOI:10.1007/s10509-013-1774-x, 2014.

## **Лабораторное и численное моделирование продольных токов планетарных магнитосфер и эффектов энергетического воздействия в ионосфере Земли**

**И. Ф.Шайхисламов (Институт лазерной физики СО РАН)**

Предложенная схема экспериментов позволяет создавать импульсные потоки плазмы с замороженным поперечным магнитным полем, движущиеся со сверх или около Альфвеновской скоростью. Применение таких потоков для взаимодействия с дипольным полем дает возможность моделирования магнитосферных эффектов с межпланетным магнитным полем южного направления.

В 2014 г. были продолжены эксперименты по второму этапу моделирования плазмы с замороженным магнитным полем. Схема опытов показана на рис. 1. В камере размером  $\varnothing 1.2 \times 5$  м обеспечивался вакуум  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр. Источник типа тета-пинча заполнял объем водородной полностью ионизованной плазмой, с концентрацией  $n^* = (2-3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , скоростью  $V_{FZ} \approx 30 \text{ км/с}$  и общей длительностью потока  $\approx 30-40$  мкс. Для направления потока плазмы вдоль оси камеры Z прикладывалось магнитное поле. Для задачи настоящего эксперимента его величина была  $B_{0,Z} = 100 \text{ Гс}$ . За счет диамагнетизма плазма частично вытесняла внешнее поле до уровня примерно 75 Гс. Далее плазму тета-пинча в магнитном поле будем называть замагниченным фоном. Альфвеновская скорость примерно равна  $V_A \approx 30 \text{ км/с}$  и превышает скорость ионного звука, которая при температуре электронов  $T_e \approx 3 \text{ эВ}$  составляет  $C_s \approx 20 \text{ км/с}$ . Фоновая плазма в достаточной степени бесстолкновительная, так как время электрон-ионных столкновений существенно больше, чем период Ларморовского вращения электронов  $\omega_{ce}\tau_{ei} \approx 10$ .



*Рис.1. Схема эксперимента:*

*1 – вакуумная камера; 2 – мишень; 3 – набор электрических и магнитных зондов.*

Публикация

Шайхисламов И. Ф., Ю. П. Захаров, В. Г. Посух, А. В. Мелехов, Э. Л. Бояринцев, А. Г. Пономаренко, В.А. Терехин «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОГО СВЕРХ-АЛЬФВЕНОВСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЗАИМОПРОНИКАЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ» Принята к печати в журнал **«Физика плазмы»**.